This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

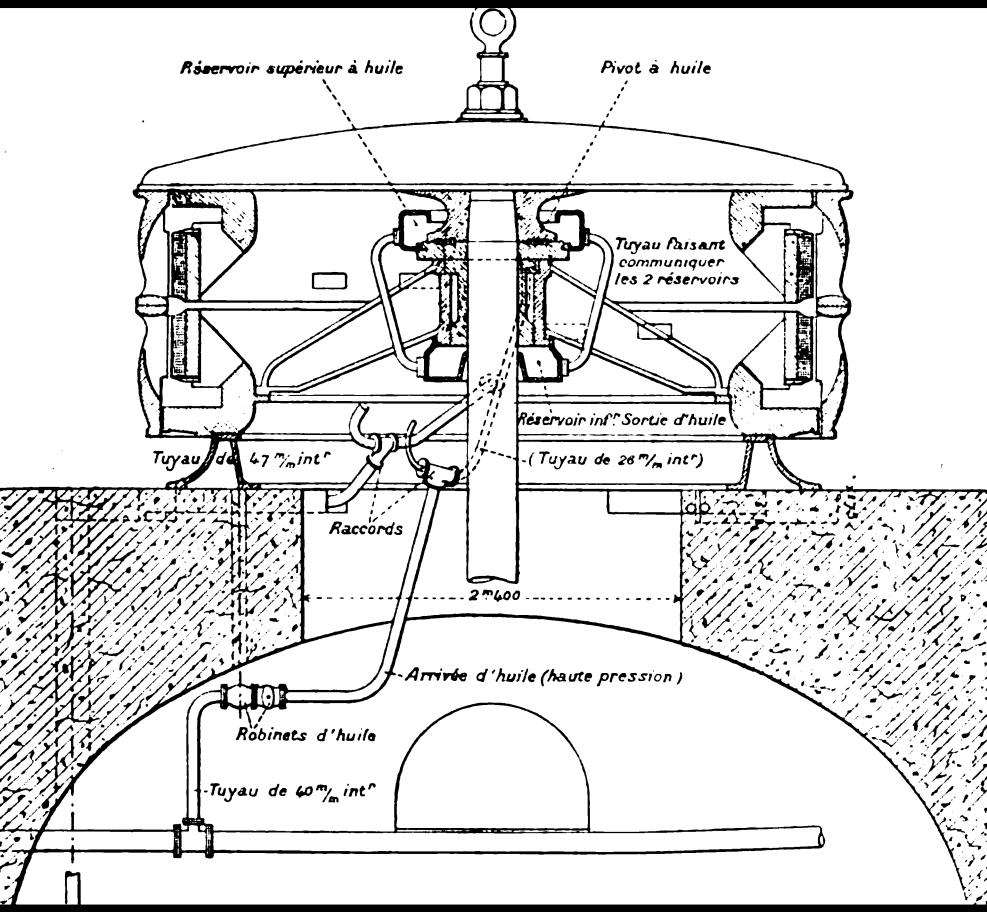
Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`



Distribution de l'énergie par courants polyphasés

Julien Rodet

Digitized by Google

Library
of the
University of Wisconsin

Digitized by Google

Digitized by Google

fo 15. –
bdy 50 4

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

PAR

COURANTS POLYPHASÉS.

Digitized by Google

32005 PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Grands-Augustins, 55.

Digitized by Google

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

PAR

COURANTS POLYPHASÉS

PAR

J. RODET,

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES.

DEUXIÈME ÉDITION,

ENTIÈREMENT REFONDUE.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1903

(Tous droits réservés.)

Digitized by Google

Digitized by Google

TOD 114973
.R61 FEB 3 1908
.2
6919642

PRÉFACE.

Lorsqu'on eut à établir des transports d'énergie à de grandes distances et des distributions sur de vastes étendues, l'emploi de courants de haute tension s'imposa. Le courant continu, par suite des difficultés et du coût élevé de sa transformation, ne satisfit plus aux exigences de la pratique.

Le courant alternatif, grâce au transformateur introduit dans l'industrie en 1883 par Gaulard, permit de transporter la puissance sous forme de courant de haute tension et de la distribuer à une série de sous-stations constituées essentiellement par un ou plusieurs transformateurs. Ces appareils, immobiles, ne demandent à peu près aucune surveillance, sont peu encombrants et, par suite, d'une installation facile aux points les plus convenables de la distribution; leur rendement est très élevé et leur coût relativement modique. Ils fournissent à leurs bornes secondaires la tension la plus appropriée à la distribution aux appareils récepteurs.

Au point de vue de la distribution de la lumière, le courant alternatif satisfaisait à toutes les conditions de la pratique; mais il n'en était pas de même en ce qui concerne la distribution de l'énergie mécanique. Il n'existait, en effet, pas de moteur à courant alternatif démarrant sous charge.

Digitized by Google

Actuellement encore, la plupart des moteurs à courant alternatif ne sont capables de développer qu'un faible couple de démarrage, et nécessitent, par conséquent, l'adjonction d'un débrayage pour leur mise en marche sous charge. Ils ont un rendement médiocre et sont d'un coût notablement supérieur à celui des moteurs à courant polyphasé.

Les courants polyphasés sont venus combler ce desideratum. Constitués par un système de courants alternatifs, ils en ont toutes les propriétés, se prêtent également bien à la transformation. Grâce aux perfectionnements réalisés dans la construction des génératrices et des transformateurs, ces courants conviennent aussi bien que le courant alternatif à la distribution de la lumière. Ils permettent, de plus, l'usage de moteurs asynchrones au moins aussi bons que ceux à courant continu, démarrant sous forte charge, d'un rendement élevé et d'un maniement facile.

C'est à l'Exposition d'Électricité de Francfort, en 1891, que les courants polyphasés firent leur première apparition dans le domaine de la pratique. C'est de cette époque que date leur application industrielle qui a pris depuis lors une si rapide extension. Cette Exposition renfermait des installations très intéressantes de divers Constructeurs, en particulier des ateliers d'Œrlikon, de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft, de Schuckert, de Lahmeyer.

C'est cette manifestation industrielle qui nous a amené à étudier cette nouvelle branche de l'industrie électrique à laquelle semblait réservé un brillant avenir. L'accueil favorable accordé à une première édition nous a encouragé à publier une deuxième édition, mise au niveau des progrès réalisés jusqu'à ce jour, dans l'espoir que ce travail pourra être de quelque utilité aux nombreux ingénieurs ou industriels qui ont à s'occuper soit de la construction du matériel, soit des installations, soit enfin de l'exploi-

Digitized by Google

tation des distributions d'énergie par courants polyphasés.

M. Gauthier-Villars a bien voulu encore nous prêter son précieux concours.

Dans le but de faciliter la lecture et les recherches, nous avons groupé les différents sujets traités dans neuf Chapitres.

Un premier Chapitre renferme un bref historique de la question, ainsi qu'un exposé sommaire des principes fondamentaux des courants polyphasés, destiné au lecteur non encore initié à cette branche de l'industrie électrique.

Les trois Chapitres suivants traitent successivement de la production, de la canalisation et de la transformation des courants polyphasés.

Le cinquième Chapitre est consacré à la conversion des courants polyphasés en courant continu et réciproquement. Le développement considérable des applications du convertisseur, ainsi que la théorie particulière et les conditions spéciales de fonctionnement de cette machine nous ont paru nécessiter une étude distincte de celle de la transformation des courants polyphasés en courants polyphasés de même ordre ou d'ordre différent, de même fréquence ou de fréquence différente.

Le sixième Chapitre traite des moteurs à courant polyphasé; le septième Chapitre a trait aux compteurs d'énergie pour courants polyphasés.

Le huitième Chapitre est consacré à l'application des courants polyphasés à la traction, application qui a acquis une grande importance.

Enfin, un dernier Chapitre est réservé à la description d'un certain nombre d'installations.

L'ingénieur-constructeur trouvera dans l'Ouvrage les principaux éléments nécessaires à l'établissement des génératrices, des transformateurs, des convertisseurs et des mo-

Digitized by Google

teurs à courant polyphasé. Nous avons indiqué dans le Chapitre II, en particulier, la force électromotrice à vide, engendrée par différents types de machines, et avons complété ces indications par l'étude de la réaction d'induit qui joue un rôle si considérable dans le cas de distribution d'énergie à des moteurs. Ce Chapitre contient également quelques considérations sur les génératrices à double courant, c'est-à-dire destinées à fournir simultanément un courant polyphasé et un courant continu.

L'étude des transformateurs a été complétée par celle d'un appareil nouveau : le changeur de fréquence.

Le calcul des convertisseurs de courant polyphasé en courant continu, leur construction et leurs conditions de fonctionnement ont reçu un développement imposé par l'importance de ces appareils.

Dans le sixième Chapitre, nous avons étudié en particulier la question si importante du démarrage des moteurs d'induction.

L'Électricien chargé d'installations, sans s'appesantir sur le calcul des génératrices, des transformateurs, des convertisseurs et des moteurs, s'assimilera aisément les notions qui lui sont utiles sur ces différents appareils. Le Chapitre III lui fournira les indications nécessaires pour le calcul et l'établissement des canalisations. Une place assez importante a été réservée dans ce Chapitre à l'étude de la chute de tension dans les canalisations et de la réaction due à l'inductance des lignes.

Le huitième Chapitre facilitera l'élaboration de projets de réseaux de chemins de fer ou de tramways de grande longueur ou répartis sur une grande étendue et pour lesquels, par conséquent, l'emploi des courants polyphasés, soit directement, soit après conversion en courant continu, est à peu près obligatoire.

Digitized by Google

Enfin le dernier Chapitre fournira une série d'exemples de distributions dans lesquels nous nous sommes appliqué à signaler les particularités les plus intéressantes, et qui montrent la variété des applications actuelles des courants polyphasés.

Afin de ne pas sortir du cadre restreint tracé à un Ouvrage spécial, et pour ne pas noyer le sujet dans des considérations générales, nous avons supposé le lecteur initié aux principes fondamentaux des courants alternatifs. Nous nous sommes du reste efforcé de faciliter l'application des théories exposées au moyen d'exemples et de Tableaux.

J. Rodet.

Lyon, 1902.

Digitized by Google

Digitized by Google

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

PAR

COURANTS POLYPHASÉS.

CHAPITRE I.

HISTORIQUE. PRINCIPES GÉNÉRAUX.

---

§ I. — Historique.

Deux principes fondamentaux forment la base du système des courants polyphasés; ce sont :

1° L'entraînement d'une armature de fer, ou d'un circuit électrique fermé, par un champ magnétique tournant, tel que celui que l'on obtient, par exemple, en faisant tourner un barreau aimanté autour de sa ligne neutre comme axe;

2° La production d'un champ magnétique tournant au moyen d'une combinaison de bobines convenablement disposées les unes par rapport aux autres, et alimentées par un système de courants alternatifs présentant entre eux certaines différences de phases. Un tel système de courants alternatifs a été appelé, pour cette raison, *courant polyphasé*.

Le rôle principal d'un courant polyphasé est donc de produire un champ tournant.

Considérons un aimant, ou un électro-aimant, en fer à cheval, mobile autour de son axe de symétrie, et montons en regard de ses pôles une armature de fer mobile autour d'un axe en prolongement du premier. Si nous imprimons à l'aimant un mouvement de rotation qui ne soit pas trop

Digitized by Google

brusque, et si le couple résistant appliqué à l'armature n'est pas trop considérable, celle-ci sera entraînée dans le sens de rotation de l'aimant.

Considérons encore une dynamo Gramme, à deux pôles inducteurs, par exemple. Séparons le collecteur de l'enroulement induit, et réunissons ensemble les deux extrémités de chaque bobine de l'armature. Tous les éléments de l'enroulement induit se trouveront donc en court-circuit.

Excitons alors l'inducteur au moyen d'une source spéciale d'électricité, une batterie d'accumulateurs, par exemple, et imprimons à l'armature, à l'aide de sa poulie, un mouvement de rotation. Il se produira dans chaque bobine un courant alternatif dont l'intensité serait, si la réaction magnétique de l'armature pouvait être négligée, proportionnelle au champ et à la vitesse de rotation.

Si la dynamo ainsi transformée, et recevant son excitation normale, était amenée à sa vitesse de régime, le courant dans chaque bobine induite serait considérable.

L'induit se trouvera soumis à un couple résistant, et la machine constituera un frein.

Inversement, si nous faisons tourner avec la même vitesse l'inducteur excité comme précédemment, nous engendrerons les mêmes courants dans les bobines de l'armature, laquelle se trouvera soumise à un couple moteur égal au couple résistant observé dans l'expérience précédente. Si donc le couple résistant appliqué à l'armature n'est pas trop considérable, celle-ci sera entraînée dans le même sens de rotation que l'inducteur.

Notons qu'à un instant quelconque, pour qu'il y ait courant induit dans l'armature et, par suite, pour qu'il se produise un couple moteur, il faut qu'il y ait mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit, c'est-à-dire que l'induit tourne moins vite que l'inducteur.

Depuis longtemps déjà divers physiciens ont observé l'entraînement d'une masse métallique par la rotation d'un aimant dans son voisinage.

En 1824, Gambey trouva que les oscillations d'une aiguille

Digitized by Google

aimantée s'amortissent plus rapidement si le fond de la boîte de boussole est en cuivre que si ce fond est en bois.

En 1825, Arago publia ses expériences sur l'entraînement d'un barreau aimanté par un disque métallique tournant. Il suspendait par un fil une aiguille aimantée au-dessus d'un disque de cuivre horizontal, parallèlement à un diamètre. En imprimant au disque un mouvement de rotation lent, l'aiguille se trouvait déviée dans le sens de rotation du disque. En augmentant suffisamment la vitesse de ce dernier, l'aiguille était entraînée dans un mouvement continu de rotation.

La même année, Babbage et Herschel renversèrent le dispositif de cette expérience d'Arago et entraînèrent le disque horizontal de cuivre en faisant tourner au-dessus de lui un aimant en fer à cheval autour de son axe de symétrie.

En 1826, Ampère observa qu'un fil de cuivre parcouru par un courant se trouve dévié par un disque de cuivre tournant dans son voisinage.

Tous les dispositifs précédents ne constituent évidemment pas des *moteurs* à champ tournant, puisqu'ils ne transforment pas en énergie mécanique une énergie de nature différente. Ils jouent simplement le rôle d'accouplements.

A notre connaissance, la première description d'un moteur d'induction à courant polyphasé date de 1879 (1).

Dans la séance du 28 juin 1879 de la *Physical Society* de Londres, Walter Baily lut un Mémoire intitulé : *A mode of producing Arago's rotation*, publié la même année dans le *Philosophical Magazine*.

Dans ce Mémoire, Baily démontre théoriquement la possibilité de produire un champ magnétique tournant au moyen d'électro-aimants fixes, excités par des courants variables de telle façon que, lorsque le courant dans un électro croît, le courant décroît dans l'autre électro. Il montre que pour produire un champ tournant il faut au moins deux électro-aimants excités respectivement par deux courants différant

(1) Ch.-Pr. Steinmetz, *Mehrphasenmotoren, einige kritische Bemerkungen zur Geschichte Theorie und Konstruktion derselben* (*Elektr. Zeitschrift*, 25 janvier 1894).

Digitized by Google

en phase d'un quart de période, et il donne le Tableau ci-dessous indiquant les polarités successives des quatre pôles des deux électro-aimants à deux branches.

N|N	O|N	S|N	S|O	S|S	O|S	N|S	N|O	N|N
S|S	S|O	S|N	O|N	N|N	N|O	N|S	O|S	S|S.

Baily donne l'explication théorique de la rotation et montre que le disque de cuivre tourne dans le même sens que le champ, et que, par conséquent, en renversant le sens du champ tournant, on renverse également le sens de rotation du disque de cuivre.

Il décrit un moteur construit par lui d'après ce principe et constitué par deux électro-aimants en fer à cheval verticaux dont les plans sont perpendiculaires, les quatre branches se trouvant à 90° l'une de l'autre. Un disque de cuivre horizontal, en regard des pôles, est mobile autour d'un axe suivant l'intersection des plans des deux électro-aimants. Ceux-ci reçoivent des courants différant en phase d'un quart de période et obtenus au moyen de deux batteries et d'un commutateur.

Baily observa qu'il est possible d'augmenter beaucoup la puissance de l'appareil en montant au-dessus du disque de cuivre une seconde paire d'électro-aimants dont les pôles sont en regard et respectivement opposés aux pôles des premiers électros.

Baily effectua encore le changement de sens de rotation par l'inversion de l'un des deux courants excitateurs.

En 1883, M. Marcel Deprez (1) montra que l'on peut obtenir un champ magnétique tournant en lançant dans deux bobines conjuguées à angle droit deux courants alternatifs de même période, mais de phases différentes. Si les deux courants ont même amplitude et diffèrent en phase d'un quart de période, le champ magnétique résultant a une intensité constante et tourne à une vitesse constante.

En mai 1887, Charles Bradley (2) prit, en Amérique, un

(1) S. Thompson, *Polyphase electric currents*, 1895. Traduit par Boistel.
(2) *Idem, ibid.*

Digitized by Google

brevet dans lequel il décrit une génératrice formée d'un anneau Gramme mobile entre les deux pôles d'un électro-aimant, et dont quatre points de l'enroulement induit situés aux extrémités de deux diamètres rectangulaires sont connectés à quatre bagues métalliques sur lesquelles frottent des balais. Chaque paire de bagues correspondant aux extrémités d'un diamètre alimente un circuit. On obtient de la sorte deux courants alternatifs dont les phases diffèrent d'un quart de période.

Bradley spécifie que cette même machine constitue un moteur qu'on alimente par deux circuits extérieurs indépendants. C'est un moteur synchrone.

L'année suivante, Bradley fit breveter un moteur asynchrone. L'organe mobile, muni de quatre bagues, reçoit un courant diphasé, et le champ tournant ainsi produit engendre des courants de Foucault dans une couronne de fer extérieure, par le glissement du champ.

En 1887, Haselwander [1] fit breveter un système de distribution d'énergie par courant triphasé (Drehstrom) et moteurs synchrones. Génératrice et moteur sont de construction identique. Ils se composent :

1° D'une armature extérieure enroulée en anneau dont l'enroulement est formé de trois bobines occupant chacune le tiers de la circonférence; les commencements de ces trois bobines sont fixés aux bornes de la machine, les trois fins sont connectées ensemble : c'est donc le montage en étoile qui est indiqué;

2° D'un électro-aimant à deux pôles, mobile à l'intérieur de l'armature. La génératrice et le moteur sont reliés au moyen d'une ligne à trois conducteurs.

Dans un second schéma Haselwander représente un transformateur élévateur de tension au départ de la ligne, et un transformateur réducteur à l'arrivée.

Plus tard, Haselwander adopta pour l'armature l'enroulement plus rationnel composé de six bobines occupant chacune un sixième de la circonférence, les deux bobines diamétralement opposées étant reliées en série. L'excitation de l'électro-

---

(1) *Officielle Zeitung der Frankfurter Ausstellung*, 1891.

Digitized by Google

aimant peut être obtenue en redressant une fraction de l'un des trois courants.

Le système Haselwander comporte donc trois courants alternatifs dont les phases diffèrent deux à deux d'un tiers de période.

Au mois de mars 1888, Galileo Ferraris présenta à l'Académie des Sciences de Turin un Mémoire sur les rotations électrodynamiques, publié par l'*Elettricita*, dans lequel il décrit son moteur classique à champ tournant.

Ce moteur se compose d'un cylindre vertical de cuivre creux, mobile à l'intérieur de deux bobines verticales conjuguées à angle droit et excitées par deux courants alternatifs différant en phase d'un quart de période.

Ferraris montre que ces deux courants engendrent à l'intérieur des deux bobines un champ magnétique tournant dont l'intensité est constante, et dont le nombre de tours par seconde est égal à la fréquence de chacun des deux courants excitateurs.

Il propose, comme procédé simple pour obtenir deux courants différant en phase, de monter en série avec l'un des enroulements du moteur une résistance sans inductance, et avec le second enroulement une bobine ayant une grande inductance, et de diviser un courant alternatif simple entre ces deux circuits dérivés. On peut obtenir de cette façon deux courants dont les phases diffèrent approximativement d'un quart de période.

Ferraris obtint encore deux courants différant en phase d'environ un quart de période en montant l'un des enroulements de son moteur en série avec le primaire d'un transformateur fonctionnant à très faible charge, et le second enroulement en série avec le secondaire de ce transformateur.

En inversant le courant dans le second circuit, il renversa le sens de rotation du moteur.

Depuis le mois de mai 1888, Nikola Tesla prit en Amérique une série de brevets pour un certain nombre de schémas se rapportant en général au courant diphasé. Cependant l'un de ces schémas correspond au courant triphasé avec montage de la génératrice et du moteur en étoile. Il décrit des moteurs synchrones et des moteurs asynchrones.

Digitized by Google

En 1889 et années suivantes, M. v. Dolivo Dobrowolsky fit breveter un moteur à courant polyphasé dont l'induit porte un enroulement en cage d'écureuil, ainsi que des transformateurs à courant triphasé.

En 1890, Wenström [1] fit breveter en Angleterre un système de distribution d'énergie par courant polyphasé; il indique le montage en étoile.

Enfin, en 1891, à l'occasion de l'Exposition de Francfort-sur-Main, l'*Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft* de Berlin, dirigée par M. v. Dolivo Dobrowolsky, et les Ateliers d'Oerlikon, ayant à leur tête M. C.-E.-L. Brown, établissent le célèbre transport d'énergie de Lauffen jusqu'aux terrains de l'Exposition de Francfort, à une distance d'environ 175^{km}.

Cette installation avait pour but de démontrer qu'il était pratiquement possible de transporter une puissance initiale de 300 chevaux à une distance de 175^{km}, au moyen de courant triphasé de très haute tension, avec un rendement acceptable.

En marche normale, la tension entre deux fils de ligne était de 14000 à 15000 volts environ. La puissance disponible à l'extrémité de la ligne était distribuée simultanément à des moteurs et à des lampes.

Les expositions des maisons Schuckert et Lahmeyer offraient également un grand intérêt au point de vue du matériel à courant polyphasé. Elles comprenaient une série de génératrices, de moteurs, de transformateurs et de convertisseurs de courant polyphasé en courant continu et *vice versa*.

Depuis cette époque, les applications des courants polyphasés ont pris une très grande extension. Ces courants se prêtent à la transformation aussi bien que le courant alternatif simple, au moyen de transformateurs immobiles. Ils permettent donc de transporter une puissance sous une très haute tension, obtenue au besoin par une première transformation, et par suite à une grande distance, et de la distribuer sur une grande étendue en la ramenant à une tension quelconque, et avec un rendement élevé, aux points d'utilisation.

Ces courants permettent l'emploi de moteurs à champ

---

(1) S. Thompson, *Polyphase electric currents*, 1895.

Digitized by Google

tournant démarrant à pleine charge, et dont le rendement est aussi élevé que celui des moteurs à courant continu.

Enfin l'emploi de convertisseurs permet de transformer aisément ces courants en courant continu.

Ces qualités ont assuré aux courants polyphasés une place prépondérante dans les grandes distributions d'énergie mécanique et de lumière.

§ II. — Principes généraux.

I. — *Courants polyphasés.*

Nous avons défini plus haut (p. 1) un courant polyphasé comme un système de plusieurs courants alternatifs ayant même période, et présentant entre eux certaines différences de phases.

Les courants polyphasés usités dans la pratique sont le *courant diphasé* et le *courant triphasé.*

Considérons une tension alternative dont la valeur instantanée e_1 est une fonction sinusoïdale du temps t, et désignons par n la fréquence :

$$e_1 = \mathcal{E} \sin 2\pi nt;$$

$2\pi nt$ est la phase de la tension.

Considérons une seconde tension alternative de même forme, de même amplitude et de même fréquence

$$e_2 = \mathcal{E} \sin(2\pi nt - \varphi).$$

Ces deux tensions ont entre elles une différence de phase φ. On dit encore que la phase de la tension e_2 est en retard de φ sur celle de e_1, ou que e_2 est décalé en arrière de e_1 d'un angle φ.

Courant diphasé. — Posons, dans l'expression ci-dessus de e_2,

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

Digitized by Google

et considérons les deux tensions

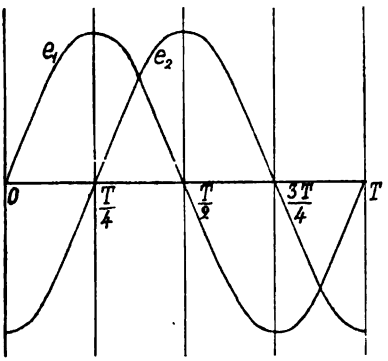
$$(1) \qquad e_1 = \mathcal{E} \sin 2\pi nt,$$

$$(2) \qquad e_2 = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right),$$

dont les phases diffèrent entre elles d'un quart de période.

Si ces deux tensions agissent respectivement sur deux circuits, elles engendrent deux courants alternatifs de même période, dont les amplitudes sont en raison inverse des impédances, et dont les phases dépendent des constantes de temps des deux circuits (*fig.* 1).

Fig. 1.



En particulier, si les impédances des deux circuits sont égales, ainsi que leurs constantes de temps, les deux courants alternatifs auront même amplitude, et leurs phases différeront d'un quart de période.

Dans la pratique, on appelle *courant diphasé* le *système des deux courants alternatifs engendrés dans deux circuits par deux tensions alternatives de même période, de même amplitude, et dont les phases diffèrent d'un quart de période.*

Ces deux courants n'ont même amplitude, et leurs phases ne diffèrent exactement d'un quart de période, que dans le cas particulier où les deux circuits ont même impédance et même constante de temps, c'est-à-dire même résistance et même inductance ou capacité.

Digitized by Google

Remarque. — Si les deux tensions e_1 et e_2, dont les phases diffèrent d'un quart de période, sont de même caractère, mais non sinusoïdales, on pourra définir la relation de leurs phases en disant que l'une de ces tensions passe par zéro un quart de période après la première.

Courant triphasé. — Considérons les trois tensions alternatives

$$e_1 = \mathcal{E} \sin 2\pi nt,$$

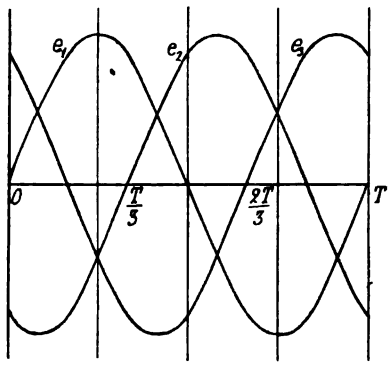
$$e_2 = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$e_3 = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right),$$

présentant entre elles une différence de phase d'un tiers de période.

Si ces trois tensions agissaient respectivement sur trois circuits, elles engendreraient trois courants alternatifs. En particulier, si ces trois circuits avaient des impédances égales et des constantes de temps égales, les trois courants alternatifs auraient même amplitude et, par suite, même moyenne, et leurs phases différeraient deux à deux d'un tiers de période (*fig.* 2).

Fig. 2.



Une ligne reliant la génératrice aux appareils récepteurs comporterait donc, de prime abord, six conducteurs. Mais

Digitized by Google

on voit immédiatement que l'on peut réunir en un seul les trois conducteurs de retour et, de la sorte, réduire la ligne à quatre conducteurs.

Nous verrons plus loin qu'on peut toujours adopter pour les appareils récepteurs un montage permettant de supprimer ce quatrième fil, et de canaliser ces courants au moyen de trois conducteurs seulement.

On obtient ainsi dans ces trois conducteurs trois courants alternatifs dont les phases diffèrent (dans le cas de charges identiques sur les trois sections, ces différences de phases sont égales à un tiers de période), et dont l'ensemble constitue un *courant triphasé*.

Ces trois courants alternatifs ne sont pas indépendants les uns des autres. Dans le *montage en étoile*, comme nous le verrons plus loin, ils sont étroitement liés ensemble. L'expression allemande *Verkettung der Phasen* (enchaînement des phases) traduit cette dépendance mutuelle des trois courants constituant un courant triphasé.

Si l'on considère trois bobines identiques, disposées à des distances égales sur un anneau et recevant ces trois courants, une valeur donnée quelconque du courant se reproduit dans l'une quelconque de ces bobines un tiers de période plus tard que dans la précédente; il semble donc que le courant tourne dans l'enroulement de l'anneau : de là le nom de *Drehstrom* (courant tournant) que les Allemands donnent au courant triphasé.

On conçoit aisément un courant polyphasé d'ordre k, produit par k tensions alternatives de même période, de même amplitude, différant deux à deux en phase de $\frac{1}{k}^{\text{ième}}$ de période, et agissant sur k circuits, ceux-ci pouvant avoir éventuellement un conducteur commun.

Remarque. — Dans une ligne à courant diphasé, à quatre conducteurs, alimentant deux circuits récepteurs identiques, les conducteurs de la première section sont parcourus respectivement par les courants

$$i_1 = \mathfrak{I} \sin(2\pi nt - \varphi),$$
$$-i_1 = \mathfrak{I} \sin(2\pi nt - \varphi - \pi),$$

Digitized by Google

et les deux conducteurs de la seconde section par les courants

$$i_2 = \mathfrak{I} \sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2} - \varphi\right),$$

$$-i_2 = \mathfrak{I} \sin\left(2\pi nt - \frac{3\pi}{2} - \varphi\right),$$

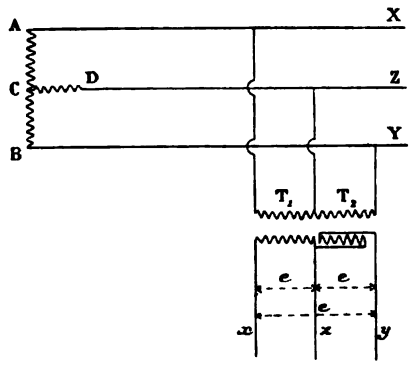
$\mathfrak{I}$ étant le courant maximum dans chaque circuit récepteur, et φ l'angle de retard de phase produit par l'inductance de chaque circuit.

On voit que les quatre courants i_1, i_2, $-i_1$, $-i_2$ présentent deux à deux une différence de phase égale à un quart de période. L'ensemble de ces quatre courants pourrait donc être désigné sous le nom de *courant tétraphasé*.

Système monocyclique. — La *General Electric Company* a appliqué un système de distribution auquel M. Steinmetz a donné l'épithète de *monocyclique*, et qui consiste essentiellement en un système à courant alternatif simple pour l'alimentation des lampes et des moteurs, avec l'adjonction d'un dispositif spécial pour le démarrage des moteurs.

Soit AB (*fig.* 3) l'enroulement induit d'une génératrice à

Fig. 3.



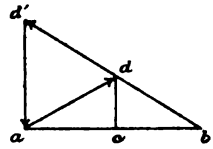
courant alternatif produisant une tension E, dont les bornes A et B sont reliées aux conducteurs AX, BY de la ligne.

Digitized by Google

Montons sur la génératrice un second enroulement CD décalé de 90° par rapport au premier et produisant une force électromotrice $\frac{E}{2\sqrt{3}}$ différant en phase d'un quart de période avec la force électromotrice aux bornes A, B.

Nous obtiendrons aux trois bornes A, B, D de la machine les trois tensions *ab*, *ad*, *db* (*fig.* 4).

Fig. 4.

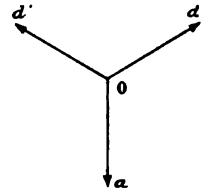


Considérons deux transformateurs T_1, T_2 (*fig.* 3) dont les enroulements primaires sont reliés en série et connectés aux conducteurs AX, BY, et dont le point commun des enroulements primaires est relié à la borne D de la génératrice par l'intermédiaire du conducteur auxiliaire DZ.

La canalisation secondaire desservant les moteurs est formée de trois conducteurs *x*, *y*, *z*.

Les deux transformateurs sont identiques. Les connexions du secondaire de l'un des transformateurs sont inversées, c'est-à-dire que le commencement de cette bobine est relié au conducteur *y* et la fin au conducteur *z*. Par cet artifice le sens de *db* (*fig.* 4) se trouve renversé, et l'on obtient alors

Fig. 5.



entre les conducteurs *x*, *y*, *z* trois tensions égales et différant en phase de 120°, *ad*, *dd'*, *d'a* (*fig.* 4), ou *od*, *od'*, *oa* (*fig.* 5).

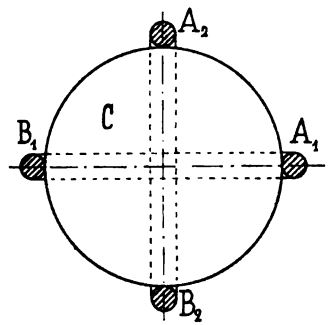
Digitized by Google

Dans le cas d'une distribution à très grande distance, on peut supprimer l'enroulement auxiliaire CD de la génératrice, ainsi que le troisième conducteur primaire entre l'usine et le lieu d'utilisation, en ne conservant que la partie de ce conducteur comprise dans le réseau de distribution. L'enroulement auxiliaire des moteurs asynchrones en marche remplace l'enroulement CD.

II. — *Production d'un champ magnétique tournant au moyen d'un courant polyphasé.*

Production d'un champ magnétique tournant au moyen d'un courant diphasé. — Considérons deux bobines identiques A_1B_1, A_2B_2 (*fig.* 6) enroulées sur un cylindre C dans deux plans rectangulaires.

Fig. 6.



Lançons dans A_1B_1 un courant alternatif de la forme

$$i_1 = \mathfrak{I} \sin 2\pi nt, \tag{1}$$

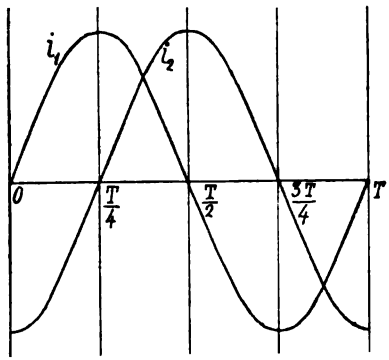
$\mathfrak{I}$ étant l'amplitude du courant et n sa fréquence, et dans A_2B_2 un courant de même amplitude et de même fréquence, mais dont la phase est en retard d'un quart de période sur le premier

$$i_2 = \mathfrak{I} \sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right) = -\mathfrak{I} \cos 2\pi nt. \tag{2}$$

Digitized by Google

A un moment quelconque, chaque bobine engendrera un champ magnétique dirigé normalement à son plan; si la réluctance du circuit magnétique est constante, l'intensité de ce champ variera proportionnellement à l'intensité du champ excitateur; le sens de ce champ dépendra du sens même du courant (*fig.* 7).

Fig. 7.



En appelant Φ la valeur maximum du champ produit par l'une des bobines, les valeurs Φ_1 et Φ_2 des deux champs composants à un instant t quelconque seront

$$(3) \qquad \Phi_1 = \Phi \sin 2\pi nt$$

$$(4) \qquad \Phi_2 = \Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right) = -\Phi \cos 2\pi nt.$$

Portons sur la circonférence $A_1A_2B_1B_2$, décrite avec un rayon égal à Φ, la longueur

$$A_1M = \Phi . 2\pi nt$$

proportionnelle au temps (*fig.* 8). Les intensités des champs magnétiques produits par les bobines A_1B_1, A_2B_2 sont représentées respectivement par OP et OQ dont la résultante est

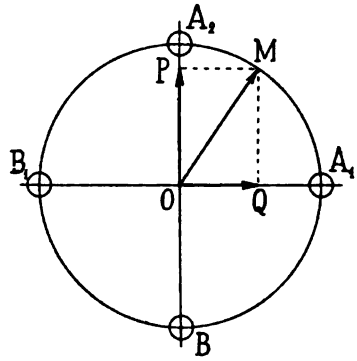
$$(5) \qquad OM = \sqrt{\Phi^2 \sin^2 2\pi nt + \Phi^2 \cos^2 2\pi nt} = \Phi.$$

Le champ magnétique résultant a donc une intensité con-

Digitized by Google

stante et égale à la valeur maximum de l'un des champs composants. Il tourne autour du point O *dans le sens* A_1A_2 *avec*

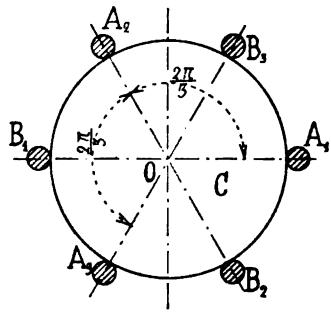
Fig. 8.



une vitesse constante, puisque la résultante passe par le point M. *Il fait un tour par période.*

Production d'un champ magnétique tournant au moyen d'un courant triphasé. — Considérons maintenant trois bobines identiques A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 (*fig.* 9) enroulées sur un

Fig. 9.



cylindre C suivant trois plans méridiens faisant entre eux des angles de 120° ou $\frac{2\pi}{3}$.

Digitized by Google

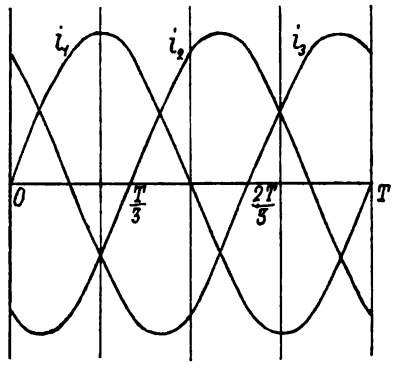
Lançons dans ces trois bobines respectivement trois courants i_1, i_2, i_3 de même amplitude, de même fréquence, mais dont les phases diffèrent deux à deux d'un tiers de période (*fig.* 10) :

$$(6) \qquad i_1 = 5 \sin 2\pi nt \qquad (A_1B_1),$$

$$(7) \qquad i_2 = 5 \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right) \qquad (A_2B_2),$$

$$(8) \qquad i_3 = 5 \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right) \qquad (A_3B_3).$$

Fig. 10.



On déduit de ces trois relations

$$(9) \qquad i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

La somme algébrique de trois courants alternatifs sinusoïdaux, de même fréquence, de même amplitude, et dont les phases diffèrent deux à deux d'un tiers de période, est donc constamment nulle.

Les champs magnétiques engendrés par les trois bobines sont respectivement perpendiculaires aux plans de celles-ci. Si la réluctance du circuit magnétique est constante, les trois

Digitized by Google

champs composants ont pour expression :

$$\Phi_1 = \Phi \sin 2\pi nt, \tag{10}$$

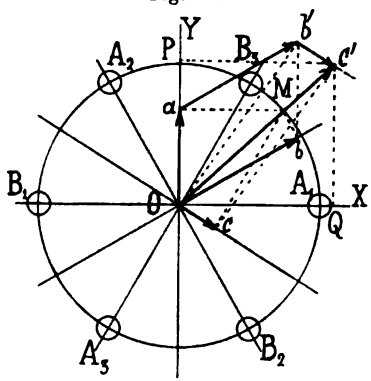
$$\Phi_2 = \Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right), \tag{11}$$

$$\Phi_3 = \Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right), \tag{12}$$

Φ étant le champ maximum produit par l'une quelconque des bobines.

Comptons toujours le temps sur la circonférence $A_1 A_2 A_3$, dont le rayon est égal à Φ et dont le développement représentera une période. Les trois champs composants sont Oa, Ob, Oc; leur résultante est la droite Oc', qui ferme le polygone des vecteurs $Oab'c'$ de ces trois composantes (*fig.* 11).

Fig. 11.



Pour calculer Oc', projetons le polygone $Oab'c'$ sur les deux axes rectangulaires OX et OY. On a

$$Oc' = \sqrt{OP^2 + OQ^2}. \tag{13}$$

Or

$$\left\{\begin{aligned} OP &= \Phi \sin 2\pi nt - \Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\frac{\pi}{3} \\ &\quad + \Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right)\cos\frac{2\pi}{3} \\ &= \left(1 + \frac{1}{2}\right)\Phi \sin 2\pi nt \end{aligned}\right. \tag{14}$$

Digitized by Google

et

$$(15)\quad \left\{\begin{aligned} OQ &= -\Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\frac{\pi}{6} \\ &\quad + \Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right)\cos\frac{\pi}{6} \\ &= \left(1 + \frac{1}{2}\right)\Phi \cos 2\pi nt, \end{aligned}\right.$$

d'où

$$(16)\qquad Oc' = \left(1 + \frac{1}{2}\right)\Phi.$$

Le champ magnétique résultant a donc une intensité constante et égale à une fois et demie la valeur maximum de chaque champ composant.

En outre, les deux composantes auxiliaires OP et OQ étant entre elles dans le rapport de $\sin 2\pi nt$ à $\cos 2\pi nt$, la résultante Oc' passe par le point M. *Le champ tourne donc autour du point* O *dans le sens* $A_1A_2A_3$ *avec une vitesse constante. Il fait un tour par période.*

Dans l'exposé qui précède, nous avons effectué la composition des champs magnétiques en les considérant comme des quantités susceptibles d'être représentées par des vecteurs; c'est le cas de l'induction magnétique suivant l'axe de chaque bobine. En réalité, dans un moteur, le champ magnétique se trouve réparti dans l'entrefer sur la surface des noyaux.

Considérons par exemple un anneau de fer laminé (*fig.* 12) garni de quatre bobines *a*, *b*, *c*, *d*. Les deux bobines *a*, *c*, diamétralement opposées, sont connectées de façon à engendrer toutes les deux un même pôle en X et un même pôle en X′, et sont reliées à l'une des sections d'une ligne à courant diphasé. Les deux bobines *b*, *d*, connectées d'une manière identique, sont reliées à la seconde section de la ligne à courant diphasé.

A l'instant $t = 0$, où le courant dans la section I

$$i_1 = \mathfrak{I} \sin 2\pi nt$$

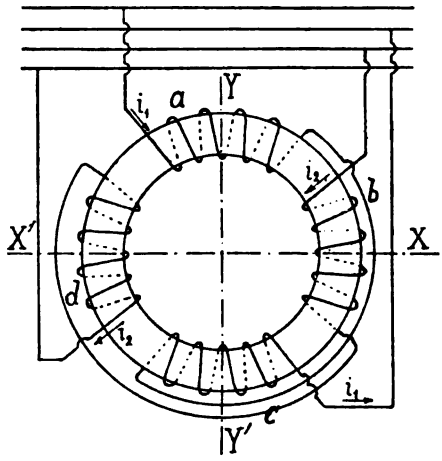
est nul, le courant

$$i_2 = -\mathfrak{I} \cos 2\pi nt$$

Digitized by Google

dans la section II passe par un maximum négatif; il est dirigé en sens contraire des flèches de la figure. La paire de bobines *b*, *d* engendre alors un pôle nord en Y et un pôle sud en Y'. Le courant i_2 décroissant en valeur absolue, le courant i_1 croît positivement et engendre un pôle nord en X et un pôle sud en X'. L'action combinée des deux paires de bobines crée donc un pôle nord situé entre Y et X et un

Fig. 12.



pôle sud situé entre Y' et X'. A mesure que le courant i_2 tend vers zéro, et que i_1 se rapproche de son maximum positif, le pôle nord se déplace de Y vers X.

Au bout d'un quart de période, i_2 passe par zéro et i_1 est maximum positif; le pôle nord créé par la paire de bobines *a*, *c*, seule active à ce moment, se trouve en X, et le pôle sud en X'. Le courant i_2 devient positif, et i_1 décroît; le pôle nord se déplace de X vers Y' qu'il atteint à l'instant où i_1 s'annule et où i_2 est maximum positif, c'est-à-dire une demi-période après l'instant pris comme origine. Le courant i_1 devient négatif, et i_2 décroît; le pôle nord s'avance de Y' vers X', où il arrive lorsque i_1 atteint son maximum négatif, i_2 étant nul; cet instant correspond à trois quarts de période. Enfin, pendant le quatrième quart de période, i_1 passe de son

Digitized by Google

maximum négatif à zéro, tandis que i_2 varie de zéro à son maximum négatif. Le pôle nord progresse de X′ en Y.

Le champ a donc fait une révolution complète dans l'intervalle d'une période.

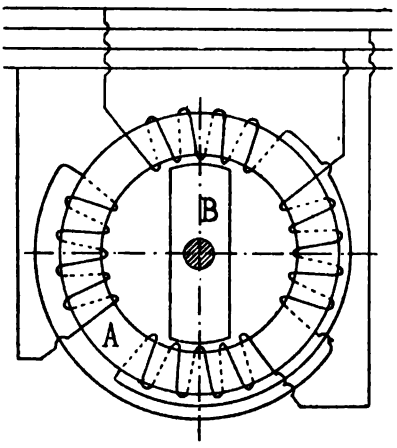
III. — *Principe des moteurs à courant polyphasé ou à champ tournant.*

Les moteurs à champ tournant se divisent en deux classes :

a. Moteurs à champ tournant synchrones;
b. Moteurs à champ tournant asynchrones.

a. **Moteurs synchrones.** — Considérons un anneau de fer laminé A (*fig.* 13) enroulé de deux paires de bobines ali-

Fig. 13.



mentées par un courant diphasé, et suivant l'axe duquel se trouve mobile le noyau de fer B.

Ainsi que nous venons de le voir, l'anneau A engendre un champ magnétique tournant qui tend à se fermer suivant un diamètre. Si nous lançons tout d'abord dans l'enroulement un courant diphasé de faible fréquence, de façon à obtenir

Digitized by Google

une rotation du champ magnétique suffisamment lente, résultat qui peut être obtenu aisément si l'appareil en question est mis en marche en même temps que la génératrice, les deux pôles magnétiques s'attacheront aux extrémités de l'armature mobile, à travers laquelle s'effectuera la fermeture du champ magnétique, par suite de la faible réluctance du noyau de fer par rapport à celle de l'air.

Si le couple résistant appliqué à l'armature n'est pas trop considérable, celle-ci se trouvera donc entraînée dans le sens de rotation du champ. En augmentant alors graduellement la vitesse de la génératrice et, par suite, la vitesse de rotation du champ, la vitesse de l'armature B croîtra également, cet organe accompagnant constamment les pôles magnétiques créés par l'anneau A. Cet appareil constitue donc un *moteur*.

Lorsque le champ magnétique a fait une révolution, l'armature B a également fait un tour complet. Si pendant un temps quelconque le champ fait *n* tours, l'armature fait également *n* tours. On dit alors que l'armature tourne synchroniquement au champ. Le moteur est dit *synchrone*.

La vitesse de rotation d'un moteur synchrone est donc indépendante de sa charge; elle ne dépend, pour un moteur donné, que de la fréquence du courant polyphasé.

Si on lançait dans le moteur le courant diphasé avec sa fréquence normale, par exemple cinquante périodes par seconde, et *si l'armature était en fer laminé*, de façon que le passage du champ n'y développe pas de courants de Foucault notables, et *si en outre cet organe ne possédait qu'une hystérésis négligeable*, l'inertie de cette pièce et, éventuellement, celle des organes qu'elle commande l'empêcheraient de suivre le champ. A chaque passage d'un pôle devant l'une de ses extrémités, celle-ci se trouverait d'abord attirée en arrière, puis en avant. Elle vibrerait en oscillant autour de sa position initiale, sans être entraînée. Le travail produit pendant une révolution par le champ sur chaque pôle de l'armature dans le sens de rotation serait égal au travail produit dans le sens contraire. Il n'y aurait pas de couple de démarrage.

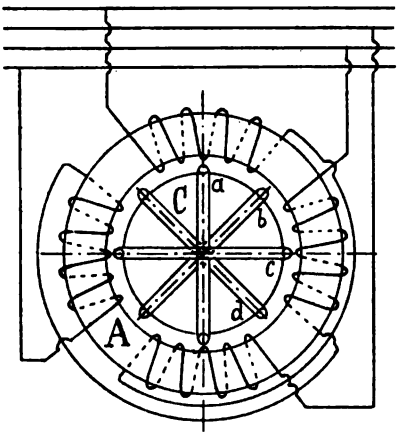
Nous verrons cependant, dans l'étude consacrée aux moteurs, qu'il est possible d'obtenir un certain couple de démarrage, même lorsque la mise en marche s'effectue avec un

Digitized by Google

courant de fréquence normale, par exemple en construisant l'armature en fer massif.

b. **Moteurs asynchrones.** — Remplaçons dans l'appareil précédent l'armature de fer par un cylindre C, également de fer (*fig.* 14), mobile autour de son axe O, et portant une

Fig. 14.



série de bobines identiques *a*, *b*, *c*, ... enroulées suivant des plans diamétraux, les deux extrémités de chaque bobine étant soudées ensemble, de telle sorte que les éléments de cet enroulement se trouvent individuellement en court-circuit.

Si nous lançons un courant diphasé dans l'enroulement extérieur fixe, nous produirons un champ magnétique tournant qui engendrera dans chaque bobine une force électromotrice numériquement égale à chaque instant au produit de la dérivée par rapport au temps du flux qui traverse la bobine considérée par le nombre de spires. Ces bobines étant en court-circuit, il s'y développera des courants proportionnels aux forces électromotrices. Ces courants, réagissant eux-mêmes sur le champ, donneront naissance à un couple qui tendra à entraîner l'armature dans le même sens de rotation que le champ.

Digitized by Google

L'appareil que nous venons de décrire constitue donc un *moteur*.

Pour qu'une force électromotrice et, par suite, un courant prennent naissance dans les bobines *a*, *b*, *c*, ..., il faut qu'il y ait variation du flux qui les traverse. Il est donc nécessaire que l'armature tourne moins vite que le champ, qu'il y ait un certain *glissement* de l'armature par rapport au champ. Le moteur fera donc dans un temps quelconque un nombre de tours moindre que le champ. Pour cette raison le moteur est dit *asynchrone*.

L'organe qui produit le champ tournant, sous l'excitation du courant polyphasé emprunté à la ligne, *induit* des courants dans l'enroulement de l'armature. Cette propriété a fait encore désigner cette sorte de moteurs sous le nom de *moteurs d'induction*.

Digitized by Google

CHAPITRE II.

PRODUCTION DES COURANTS POLYPHASÉS.

GÉNÉRATRICES DE COURANT POLYPHASÉ.

§ I. — Principes généraux.

Considérons m enroulements engendrant respectivement m tensions alternatives sinusoïdales

$$e_1 = \mathcal{E} \sin 2\pi nt,$$
$$e_2 = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{m}\right),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots,$$
$$e_k = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - 2\pi \frac{k-1}{m}\right),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots,$$
$$e_m = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - 2\pi \frac{m-1}{m}\right),$$

ayant même fréquence et même amplitude, et dont les phases diffèrent deux à deux de $\frac{1}{m^{\text{ième}}}$ de période.

Si l'on voulait transmettre la puissance produite par chaque section génératrice d'une manière tout à fait indépendante, la ligne posséderait donc $2m$ conducteurs.

Dans la pratique, on connecte les sections génératrices de deux façons différentes qui permettent de réduire le nombre des conducteurs de la ligne à m, ou au maximum à $m+1$.

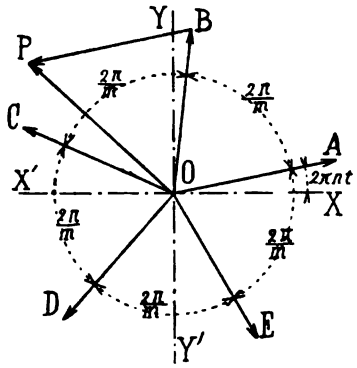
1° *Montage polygonal ou fermé.* — Relions la fin de chaque section au commencement de la suivante. Nous obtiendrons

Digitized by Google

ainsi un enroulement générateur présentant m bornes que nous relierons à m fils. Les tensions alternatives entre les fils consécutifs seront les tensions $e_1, e_2, \ldots, e_m$.

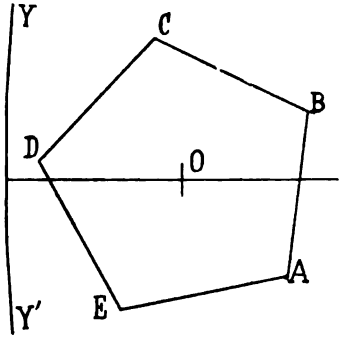
Ces tensions instantanées sont représentées par les projec-

Fig. 15.



tions des vecteurs OA = OB = ... = OE = $\mathcal{E}$ sur un axe Y'Y (*fig.* 15). La somme algébrique de ces tensions instantanées agissant dans le circuit fermé de l'induit est égale à la pro-

Fig. 16.



jection sur l'axe Y'Y de la ligne de clôture du polygone des vecteurs ABC... A (*fig.* 16). Dans le cas considéré, les vecteurs OA, OB, ... sont égaux et forment entre eux des

Digitized by Google

angles égaux dont la somme est égale à 2π; le polygone ABC...A est donc fermé; la résultante des tensions intérieures est par suite constamment nulle; il ne se produira par conséquent aucun courant circulaire, ou de court-circuit, dans l'induit.

Dans le cas d'une génératrice de courant triphasé, ce montage est dit *en triangle* (*fig.* 17); on a alors $m = 3$, et

$$(1) \qquad e_1 = \mathcal{E} \sin 2\pi nt,$$

$$(2) \qquad e_2 = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$(3) \qquad e_3 = \mathcal{E} \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right),$$

$$(4) \quad \sin 2\pi nt + \sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right) = 0,$$

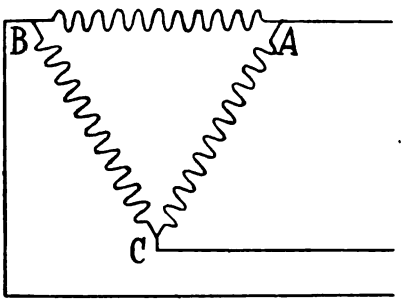
et par suite

$$(5) \qquad e_1 + e_2 + e_3 = 0,$$

résultat que nous avons déjà trouvé par la méthode géométrique.

Remarque. — Les m sections génératrices que nous avons considérées pourraient être obtenues en reliant à m bagues mé-

Fig. 17.



talliques m points d'un anneau Gramme à une distance de $\frac{2\pi}{m}$.

On voit donc que, si les conducteurs sont répartis uniformé-

Digitized by Google

ment sur le noyau induit, il n'est pas nécessaire, pour que le courant circulaire soit nul, que l'induction dans les sections polyphasées soit sinusoïdale. Si le champ était variable, il suffirait que toutes les lignes de force actives émises par un pôle traversent l'enroulement dans les deux sens.

Il n'y a encore aucun courant circulaire si le champ subit des déformations périodiques, pourvu que les deux moitiés de ce champ dans l'entrefer restent constamment symétriques par rapport à l'axe de l'induit.

2° *Montage ouvert, ou en étoile.* — Réunissons ensemble les commencements de toutes les sections génératrices, et relions aux bornes de la machine les fins de tous ces enroulements. Deux sections consécutives se trouvent de la sorte montées en opposition.

La tension entre les bornes 2 et 1, par exemple, est égale à la résultante des tensions e_2 et $-e_1$. Cette tension est donnée par la projection de OP sur Y'Y (*fig.* 15); elle a pour expression

$$(6) \qquad e_{BA} = \mathcal{E}\left[\sin\left(2\pi nt + \frac{2\pi}{m}\right) - \sin 2\pi nt\right],$$

ou encore

$$\left\{\begin{aligned} e_{BA} &= 2.\mathcal{E}\sin\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{2\pi}{m}\right)\sin\left(2\pi nt + \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}\,\frac{2\pi}{m}\right) \\ &= 2.\mathcal{E}\sin\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{2\pi}{m}\right)\sin\left(2\pi nt + 2\pi\,\frac{m+2}{4m}\right). \end{aligned}\right.$$

La valeur maximum de la tension E_{BA} est donc

$$(7) \qquad \mathcal{E}' = 2.\mathcal{E}\sin\left(\frac{1}{2}\cdot\frac{2\pi}{m}\right).$$

Si E est la tension efficace engendrée par chaque section génératrice, la tension efficace entre deux bornes de la machine est

$$(8) \qquad E' = 2.E\sin\frac{\pi}{m}.$$

En désignant par E_e la tension maximum entre deux points

Digitized by Google

de l'enroulement diamétralement opposés, c'est-à-dire la tension aux balais si la machine était montée comme dynamo à courant continu, le potentiel maximum de chaque bague au-dessus du potentiel moyen est $\frac{E_c}{2}$. La différence de potentiel efficace entre deux bagues consécutives est donc (*fig.* 15)

$$(9) \qquad E' = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2 \frac{E_c}{2} \sin\frac{\pi}{m} = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{m}.$$

Cas d'une génératrice de courant triphasé.

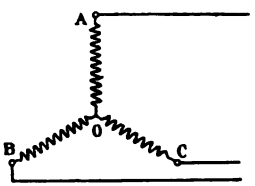
Montage en triangle. — La tension efficace entre deux bornes consécutives quelconques de la machine est évidemment égale à la tension efficace E engendrée par la section génératrice correspondante.

Nous verrons plus loin qu'en désignant par I le courant efficace dans chacune des trois sections supposées également chargées, le courant à une borne est

$$(10) \qquad J = I\sqrt{3} = 1,732\, I.$$

Montage en étoile. — La figure 18 représente le schéma du montage en étoile d'une génératrice de courant triphasé.

Fig. 18.



La tension efficace aux bornes, déduite de la relation (8), est

$$(11) \qquad E' = E\sqrt{3} = 1,732\, E.$$

Le courant à une borne est évidemment I.

Digitized by Google

Puissance de la machine. — Nous verrons, dans l'étude des canalisations, que si la machine travaille sur des récepteurs chargeant également les trois sections et ne décalant pas le courant, l'intensité dans chaque section génératrice coïncide en phase avec la tension aux bornes de cette section, que le montage soit en triangle ou en étoile.

Dans ces conditions, la puissance de la génératrice montée en triangle est

$$3\,EI = EJ\sqrt{3},$$

et la puissance de la machine montée en étoile est

$$3\,EI = E'I\sqrt{3}.$$

La puissance est donc la même dans les deux cas. Si nous appelons E la tension aux bornes et I le courant à une borne d'une machine à courant triphasé, sa puissance est donc, quel que soit le montage,

$$(12) \qquad P = EI\sqrt{3} = 1,732\,EI.$$

Nous verrons encore que, si les récepteurs chargeant uniformément les trois sections décalent le courant d'un angle φ, la puissance réelle fournie par la machine est

$$(13) \qquad P = EI\sqrt{3}\cos\varphi = 1,732\,EI\cos\varphi.$$

Nous avons établi le rapport 1,732 de la tension *composée* à la tension simple, pour le montage en étoile, dans l'hypothèse d'induction sinusoïdale. Dans la pratique, ce rapport n'est obtenu qu'avec certaines proportions des pièces polaires et pour une certaine répartition de l'enroulement induit.

Nous avons déterminé expérimentalement ce rapport pour une machine à courant triphasé de 50 kilowatts.

L'induit, extérieur et fixe, est formé d'un noyau de tôle portant sur sa surface intérieure 48 cannelures semi-ouvertes dans lesquelles sont logées les bobines induites, enroulées en tambour. Il y a deux cannelures par section triphasée et par pôle. Cette machine étant destinée à des essais de matériel à courant triphasé, les trois sections génératrices pouvaient être connectées soit en triangle, soit en étoile, de façon à donner à volonté 115 ou 200 volts.

Digitized by Google

L'inducteur mobile à l'intérieur de l'induit est formé d'une étoile de tôle dont les branches portent l'enroulement excitateur relié à deux bagues de bronze isolées, calées sur l'arbre, auxquelles deux balais amènent le courant d'excitation.

Le développement d'un pôle est les $\frac{2}{3}$ du pas polaire. L'entrefer est égal à 5^{mm}.

Puissance de la machine, en kilowatts	50
Tension aux bornes, en volts	115 ou 200
Intensité normale dans une section, en ampères	145
Nombre de tours par minute	750
Fréquence, en périodes par seconde	50

Induit.

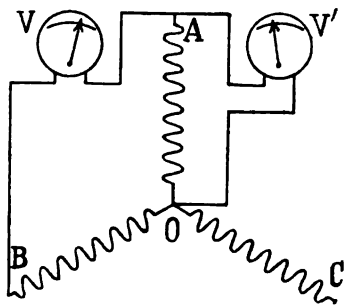
Diamètre intérieur du noyau, en millimètres	524
Longueur du noyau, en millimètres	400
Nombre de cannelures	48
Nombre de conducteurs par cannelure	3

Inducteur.

Nombre de pôles	8
Nombre de spires par pôle	250
Courant d'excitation maximum, en ampères	13,7

La machine étant montée en étoile (*fig.* 19), à circuit

Fig. 19.



ouvert, et sa vitesse étant maintenue à 750 tours par minute,

Digitized by Google

on a fait varier l'excitation et dressé, à l'aide de deux voltmètres V et V′ montés respectivement entre les bornes A et B, et entre une borne A et le centre O de l'étoile, le Tableau ci-dessous.

INDICATION de V.	INDICATION de V′.	RAPPORT $\frac{V}{V'}$.	RAPPORT $\frac{V}{V'} : \sqrt{3}$.
volts	volts		
120	70	1,714	0,990
150	87	1,724	0,995
200	119	1,680	0,970
240	142	1,690	0,975
250	146	1,712	0,988

On voit donc que dans cette expérience le rapport le plus faible est d'environ 3 pour 100 inférieur au rapport théorique 1,732.

Les considérations que nous avons développées pages 29 et 30 sembleraient établir l'équivalence complète du montage en triangle et du montage en étoile. En pratique, le montage en étoile conduit souvent à un enroulement plus simple que le montage en triangle, surtout pour des machines à haute tension. En second lieu, les forces électromotrices instantanées engendrées dans les trois sections peuvent ne pas s'équilibrer exactement. Il en résulte, dans le cas du montage en triangle, un courant circulaire dans l'enroulement induit, courant qui a comme effet de produire un échauffement des fils et, par suite, de réduire dans une certaine mesure la puissance et le rendement de la machine.

Nous avons monté en triangle la machine à courant triphasé de 50 kilowatts à 115 volts, 50 périodes par seconde, dont il vient d'être question; nous avons intercalé entre le commencement *a* d'une section et la fin *a′* de la section adjacente (*fig.* 20) un ampèremètre A à effet calorifique, du genre Cardew, et relié un voltmètre V aux bornes de l'une des sections.

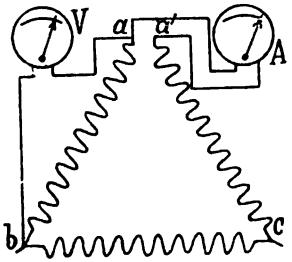
La vitesse de rotation étant maintenue à 750 tours par

Digitized by Google

minute, nous avons fait varier le courant d'excitation, la machine fonctionnant à circuit ouvert.

Nous avons inscrit dans le Tableau ci-dessous une série de valeurs du courant d'excitation, les tensions correspondantes entre deux bornes et le courant circulaire de l'induit.

Fig. 20.



Nous avons porté dans la dernière colonne le rapport du courant circulaire, exprimé en ampères, à la tension entre deux bornes exprimée en volts.

TOURS par minute.	COURANT d'excitation.	INDICATION de V.	INDICATION de A.	RAPPORT $\frac{A}{V}$.
	ampères	volts	ampères	
750	5	67	17,7	0,264
»	6,8	90	23,2	0,258
»	8	104	26,4	0,254
»	10	120	31,0	0,258
»	13	135	33,1	0,245
»	15	138	33,8	0,244

Les nombres de la dernière colonne montrent que le courant circulaire croît un peu moins vite que proportionnellement à la force électromotrice dans une section, ou encore au champ.

Si l'on réduit la vitesse même de 30 ou 35 pour 100, *en maintenant l'excitation constante*, l'aiguille de l'ampèremètre A reste immobile. Si l'on abaisse considérablement la vitesse, le courant circulaire diminue très lentement. Ce cou-

Digitized by Google

rant est donc, entre des limites étendues, à peu près indépendant de la vitesse; il dépend presque uniquement de l'intensité du champ inducteur.

Pour la tension normale de 115 volts, à 750 tours par minute, ce courant, obtenu par interpolation, est d'environ 29,4 ampères, soit sensiblement 20 pour 100 du courant de travail dans chaque section.

Nous n'avons pas déterminé le caractère de ce courant circulaire, mais les indications de l'ampèremètre employé étaient fournies par l'échauffement d'un fil et, par suite, mesuraient le courant efficace.

Le courant circulaire a comme effet d'ajuster à chaque instant les tensions aux bornes des trois sections, de telle sorte que leur somme algébrique soit constamment nulle. Son action principale est une réaction sur le champ.

Dans les machines bien établies, ce courant circulaire ne joue qu'un rôle de faible importance. Ainsi l'auteur a enroulé en triangle une machine à courant triphasé de 150 kilowatts à 190 volts aux bornes, qui s'est très bien comportée. Cependant, ce courant circulaire donnant lieu à une certaine perte de puissance, on adopte en général le montage *en étoile*.

§ II. — Force électromotrice d'une génératrice de courant polyphasé et réaction d'induit.

I. — *Force électromotrice d'une génératrice à circuit ouvert.*

Considérons tout d'abord une machine dont l'induit est enroulé en tambour, et dont l'inducteur possède $2p$ pôles alternativement nord et sud. Chaque section génératrice a p bobines formées chacune de a spires. Chaque bobine induite est logée dans une paire de cannelures correspondant chacune à un pôle inducteur, c'est-à-dire que le noyau induit possède une seule cannelure par section polyphasée et par pôle.

Chaque pôle inducteur émet un flux Φ, en maxwells, pénétrant dans le noyau induit.

La machine faisant N tours par minute, et toutes les bobines d'une section étant supposées montées en série, la

Digitized by Google

force électromotrice efficace engendrée dans cette section est

$$(14) \qquad E = f.4ap^2\Phi \frac{N}{60} 10^{-8} \text{ volts},$$

f étant un coefficient dépendant de la répartition du flux dans l'entrefer et, par suite, des proportions et de la forme des surfaces des noyaux inducteur et induit.

M. Fleming a appelé ce coefficient f *facteur de forme*. En désignant par y l'ordonnée à l'instant t d'une onde alternative de période T, on a

$$(15) \qquad f = \frac{\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} y^2 dt}}{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} y dt}.$$

C'est le rapport de la racine carrée de la moyenne des carrés à la moyenne arithmétique de la grandeur variable, c'est-à-dire le rapport de la moyenne efficace à la moyenne arithmétique.

Nous reproduisons ci-dessous le Tableau donné par M. Fleming.

FORME DE LA COURBE.	RAPPORT de l'ordonnée moyenne vraie à l'ordonnée maximum.	RAPPORT de l'ordonnée efficace à l'ordonnée maximum.	FACTEUR de forme f.
Sinus	0,637	0,707	1,11
Demi-cercle	0,7854	0,835	1,063
Triangle	0,5	0,58	1,16
Rectangle	1,0	1,0	1,0
Demi-ellipse	0,785	0,816	1,039
Parabole à axe vertical	0,666	0,730	1,096
Deux demi-paraboles se coupant en pointe	0,333	0,447	1,35

Nous venons d'examiner le cas particulier où toutes les spires d'une même bobine sont logées dans une paire de cannelures dont l'espacement est égal à la distance entre

Digitized by Google

axes de deux pôles inducteurs consécutifs, de telle sorte que toutes les spires de cette bobine sont traversées, à chaque instant, par le même flux, abstraction faite de la dispersion magnétique à l'intérieur des cannelures.

Cette disposition donne, pour un nombre de spires déterminé, la force électromotrice la plus élevée, et correspond par suite au maximum d'utilisation du cuivre induit.

D'autre part, l'isolation entre l'enroulement induit et le noyau présente un développement moins grand que si l'enroulement était logé dans plusieurs cannelures. Le dispositif comportant une seule cannelure par section et par pôle permet donc la plus grande épaisseur d'isolant entre les bobines et le noyau, pour une section de cannelures et une section de cuivre données. Il se prête donc particulièrement à la production de très hautes tensions.

Par contre, l'emploi d'une cannelure unique par section et par pôle peut conduire, pour des machines à fréquence peu élevée et à vitesse tangentielle importante, à des dimensions de cannelures considérables qui obligeraient à donner au noyau d'armature une grande épaisseur radiale.

De plus, l'enroulement d'un très grand nombre de fils dans une même cannelure peut présenter certaines difficultés d'exécution.

En outre, la grande section de la bobine réduirait le refroidissement de l'enroulement, particulièrement des conducteurs logés au centre du faisceau.

Enfin, lorsque la machine est en charge, la réaction de l'enroulement induit non réparti peut altérer très notablement la forme du champ inducteur. Le caractère de la tension aux bornes de la machine en charge peut donc différer de celui de la tension à circuit ouvert.

Ces considérations ont amené un certain nombre de constructeurs à adopter plusieurs cannelures par section et par pôle.

Pour un même champ et pour une même vitesse, la force électromotrice engendrée par un même nombre de spires est alors plus faible que dans le cas d'une cannelure unique par section et par pôle, et l'on doit affecter le second membre de la formule (14), page 35, d'un second coefficient k tenant

Digitized by Google

compte de la répartition de l'enroulement induit; la formule générale exprimant la force électromotrice efficace fournie par l'une des sections de la génératrice est donc

$$(16) \qquad E = k.f.4ap^2\Phi\frac{N}{60}10^{-8} \text{ volts.}$$

La tendance actuelle des constructeurs est d'établir les machines de façon qu'elles produisent une force électromotrice sensiblement sinusoïdale, tant en charge qu'à circuit ouvert. On supprime de la sorte, tout au moins partiellement, les harmoniques supérieures qui présentent certains inconvénients.

On obtient une force électromotrice sinusoïdale, à circuit ouvert, en donnant aux surfaces polaires des dimensions et une forme appropriées. Pour conserver la même forme à la force électromotrice en charge, on distribue l'enroulement de chaque section dans plusieurs cannelures par pôle.

Nous nous proposons de déterminer le coefficient de distribution k, pour divers nombres de cannelures par section et par pôle, en supposant le champ réparti sinusoïdalement dans l'entrefer.

Remarquons tout d'abord que dans cette hypothèse le facteur de forme f est, d'après le Tableau de la page 35, égal à 1,11.

Soient e la force électromotrice efficace engendrée par une spire, et a le nombre de spires en série.

Désignons par E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 les forces électromotrices engendrées par l'enroulement logé respectivement dans 1, 2, 3, 4 et 5 cannelures par section et par pôle. On a

$$(17) \quad E_1 = a\,e,$$

$$(18) \quad E_2 = 2\frac{a}{2}e\cos\frac{\pi}{12} = 0{,}966\ a\,e = 0{,}966\ E_1,$$

$$(19) \quad E_3 = \frac{a}{3}e + 2\frac{a}{3}e\cos\frac{2\pi}{18} = 0{,}960\ a\,e = 0{,}960\ E_1,$$

$$(20) \quad E_4 = \frac{a}{4}e\left[2\cos\frac{\pi}{24} + 2\cos\left(\frac{\pi}{24} + \frac{2\pi}{24}\right)\right] = 0{,}9575\,a\,e = 0{,}9575\,E_1,$$

$$(21) \quad E_5 = \frac{a}{5}e\left[1 + 2\cos\frac{2\pi}{30} + 2\cos\left(2\frac{2\pi}{30}\right)\right] = 0{,}9568\,a\,e = 0{,}9568\,E_1.$$

Enfin nous verrons plus loin que ce facteur k tend vers 0,9549 quand le nombre de cannelures augmente indéfiniment.

Digitized by Google

Les résultats qui précèdent nous ont servi à dresser le Tableau ci-dessous.

NOMBRE de cannelures par section et par pôle.	1.	2.	3.	4.	5.	∞.
Coefficient f.....	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Coefficient k.....	1	0,966	0,960	0,9575	0,9568	0,9549
Produit kf.....	1,11	1,072	1,066	1,063	1,062	1,060

Remarque. — Lorsque la courbe de la force électromotrice est une sinusoïde, le rapport de l'ordonnée maximum à la valeur efficace est égal à $\sqrt{2} = 1,414$. Dans la pratique, ce rapport varie suivant les machines entre 1,2 et 1,6. Pour les génératrices du Niagara, à courant diphasé, de 5000 chevaux, à 2300 volts, 25 périodes par seconde, 250 tours par minute, ce rapport est indiqué comme égal à 1,285, à circuit ouvert.

M. Kapp donne la formule suivante pour calculer la force électromotrice efficace d'une machine :

$$E = K.nz\Phi 10^{-8} \text{ volts,} \tag{22}$$

n étant la fréquence en périodes par seconde, z le nombre des conducteurs coupés par le champ inducteur, Φ le flux, en maxwells, émanant de chacun des pôles, et K un coefficient dépendant des rapports de la largeur d'une bobine et de la largeur du pôle au pas polaire. M. Kapp a dressé le Tableau ci-dessous, en supposant que le flux est uniforme dans l'entrefer entre les surfaces polaires et le noyau d'armature, et qu'il ne s'épanouit pas en dehors des surfaces polaires.

RAPPORT de la largeur d'une bobine au pas polaire.	0.	$\frac{1}{3}$.	$\frac{1}{2}$.	$\frac{2}{3}$.	1.
	Coefficient K.				
Rapport de la largeur d'un pôle au pas polaire..... $\frac{1}{1}$	2	1,76	1,63	1,49	1,16
$\frac{2}{3}$	2,46	2,31	2,13	1,94	1,49
$\frac{1}{2}$	2,83	2,50	2,30	2,12	1,63
$\frac{1}{3}$	3,46	»	»	»	»

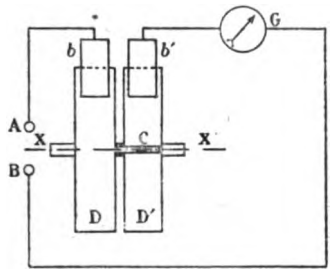
Digitized by Google

Remarque. — Dans le cas d'une machine unipolaire, ou à fer tournant, il faut remplacer a par $\frac{a}{2}$ dans les relations (14) et (16), et z par $\frac{z}{2}$ dans l'équation (22).

Détermination des courbes de la tension et du courant. — Le principe de la méthode classique de M. Joubert est le suivant :

On cale sur l'axe XX′ de la machine (*fig.* 21) un disque de

Fig. 21.



cuivre D et un disque D′ de matière isolante, sur lesquels frottent deux balais métalliques b et b'. Le disque D porte une languette C, également de cuivre, qui vient s'incruster dans la surface cylindrique du disque D′. Le balai b est connecté à l'une des bornes A de la machine, dont la deuxième borne B est reliée à un galvanomètre G et au balai b'. Ce balai b' peut être fixé à volonté dans une position quelconque autour de l'axe XX′, de telle sorte que les bornes A, B de la machine peuvent être fermées sur le galvanomètre G par l'intermédiaire des balais b, b' du disque D et de la languette C à un instant correspondant à une position déterminée quelconque de l'armature par rapport à l'inducteur. Si la rotation est suffisamment rapide, la déviation du galvanomètre G, mesurant la différence de potentiel aux bornes A, B pour la phase choisie de la période, est constante.

En modifiant successivement le calage du balai b', on peut donc déterminer une série de points de la courbe de la tension pendant une période.

Digitized by Google

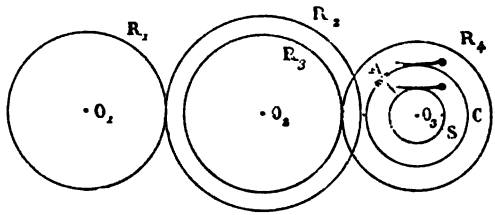
Pour mesurer les tensions instantanées, il est préférable d'employer, au lieu d'un galvanomètre, un condensateur que l'on décharge dans un galvanomètre balistique ou, mieux encore, un électromètre de faible capacité et soigneusement isolé.

Pour déterminer la forme du courant, on monte sur l'un des conducteurs une résistance connue aux extrémités de laquelle on connecte le condensateur ou l'électromètre.

M. Sahulka a modifié la méthode de M. Joubert de la façon suivante :

Une roue dentée R_1 (*fig.* 22), ayant m dents, est calée sur

Fig. 22.



l'arbre O_1 de la génératrice et engrène avec une roue R_2, munie de $m+1$ dents, calée sur l'axe O_2 en même temps qu'une troisième roue R_3 ayant m dents et engrenant avec une quatrième roue R_4 portant $m-1$ dents. Sur l'axe O_3 sont calés deux disques de stabilite C et S. Le disque C porte sur sa circonférence un contact de cuivre A relié au cercle de cuivre formant le limbe du disque S.

Deux balais reliés aux bornes de la génératrice et au galvanomètre servant de voltmètre frottent sur ces disques.

Lorsque la roue R_1 a fait 1 tour, R_4 a fait

$$\frac{m}{m+1} \times \frac{m}{m-1} = \frac{m^2}{m^2-1} \text{ tours.}$$

Donc lorsque R_1 a effectué m^2-1 tours, R_4 a fait m^2 tours. Si m est suffisamment grand, le contact A avance lentement par rapport à la génératrice, ce qui permet de noter un grand nombre de valeurs instantanées de la tension au moyen d'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir.

Digitized by Google

M. Peukert a appliqué cette méthode à une machine à courant alternatif Siemens W, à disque, à 8 pôles, 720 tours par minute.

La roue R_1, calée sur l'arbre de cette machine, a 160 dents. Quand la machine a fait $\frac{160^2}{} - 1 = 25599$ tours, la roue R_1 a effectué 25600 tours, c'est-à-dire en $35^m 30^s$ environ un tour de plus que la machine W. Or à un tour de la génératrice correspondent 4 périodes; donc les mesures pendant une demi-période exigeront $4^m 30^s$.

On peut faire en 5 minutes 54 lectures avec un galvanomètre apériodique sensible, et déterminer ainsi 54 points de la courbe.

On peut caler, sur l'axe O_3, trois disques permettant de déterminer simultanément les courbes des trois tensions ou des trois intensités dans le cas d'un courant triphasé, ou, dans le cas d'un courant alternatif simple, la tension, l'intensité, et le courant d'excitation.

Les courbes de tension et de courant peuvent encore être déterminées à l'aide des oscillographes, instruments étudiés en particulier par M. A. Blondel [1] et par M. Duddell.

Un oscillographe est un galvanomètre sensible dont les déviations sont proportionnelles au courant qui le traverse, et dont le moment d'inertie est assez petit pour que l'instrument suive exactement les variations de ce courant, malgré la rapidité avec laquelle celles-ci s'effectuent.

L'organe mobile porte un miroir reflétant un rayon lumineux sur un papier photographique qui se déplace d'un mouvement uniforme, et sur lequel viennent s'inscrire les courbes de la tension ou du courant.

II. — *Utilisation d'une génératrice de courant polyphasé comme machine à courant alternatif simple.*

Considérons une génératrice de courant diphasé munie de deux enroulements induits distincts, produisant chacun un

---

[1] A. Blondel, *Les progrès récents des oscillographes* (*L'Industrie électrique*, 10 avril et 25 août 1899).

Digitized by Google

courant alternatif de tension E et d'intensité I. La puissance de la machine est

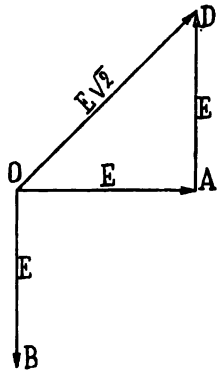
$$P = 2EI. \tag{1}$$

Montons maintenant les deux sections génératrices en série, et relions les extrémités de l'enroulement ainsi formé à deux bornes de la machine. La tension aux bornes sera (*fig.* 23)

$$E\sqrt{2} = 1,414\,E. \tag{2}$$

Pour une même perte en watts dans l'enroulement induit

Fig. 23.



que dans le cas précédent, l'intensité sera encore égale à I, et la puissance de la machine à courant alternatif sera

$$E\sqrt{2}.I = 0,707\,P, \tag{3}$$

c'est-à-dire inférieure d'environ 30 pour 100 à la puissance de la génératrice à courant diphasé.

Soit maintenant une génératrice de courant triphasé dont chaque section produit un courant I et une tension E. La puissance de la machine, ainsi que nous l'avons vu, est

$$P = 3EI. \tag{4}$$

Si nous n'utilisons que l'une des sections, nous aurons une machine à courant alternatif simple.

Digitized by Google

Si l'on veut que la quantité de chaleur dégagée dans l'enroulement induit pendant l'unité de temps soit la même que dans le cas de la machine à courant triphasé, l'intensité sera évidemment

$$I' = I\sqrt{3} \tag{5}$$

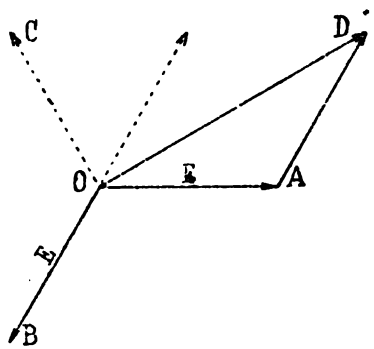
et la puissance de la machine à courant alternatif sera

$$P' = EI\sqrt{3} = 0,577\,P. \tag{6}$$

La quantité de chaleur dégagée dans chaque bobine pendant l'unité de temps serait trois fois plus grande que dans le cas de la génératrice de courant triphasé; l'échauffement des fils pourrait donc être excessif.

La machine étant montée *en étoile,* utilisons seulement deux des sections (*fig.* 24). La tension aux bornes de la

Fig. 24.



machine à courant alternatif sera

$$OD = E\sqrt{3}. \tag{7}$$

Pour une même perte en watts dans l'enroulement induit que dans le cas de la machine à courant triphasé, l'intensité I' sera telle qu'on ait

$$2RI'^2 = 3RI^2,$$

Digitized by Google

d'où

$$I' = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I = 1,228 I, \tag{8}$$

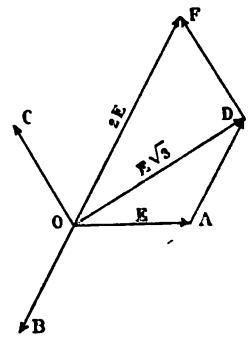
et la puissance de la machine à courant alternatif sera

$$P' = \frac{3}{\sqrt{2}} EI = \frac{P}{\sqrt{2}} = 0,707 P, \tag{9}$$

c'est-à-dire d'environ 30 pour 100 inférieure à la puissance de la génératrice de courant triphasé.

Enfin, on pourrait adopter un troisième dispositif : la troisième section étant séparée du centre de l'étoile sera montée en série avec les deux premières, comme l'indique la figure 25.

Fig. 25.



La tension aux bornes sera alors

$$OF = 2E. \tag{10}$$

La puissance sera évidemment

$$P' = 2.EI = \frac{2}{3} P. \tag{11}$$

La machine sera donc moins puissante que dans le cas précédent, où nous avons utilisé seulement deux sections. La réaction d'induit sera plus élevée, et le poids de cuivre induit de 50 pour 100 supérieur. Le deuxième montage est donc le plus rationnel.

Digitized by Google

III. — *Réaction d'induit.*

Considérons une génératrice à circuit induit ouvert, tournant à sa vitesse de régime et excitée de manière à fournir la tension normale aux bornes. Fermons alors l'induit sur des récepteurs, de façon à faire débiter à la machine le courant normal, par exemple. L'excitation et la vitesse étant maintenues constantes, la tension aux bornes baissera.

Cette baisse de tension dépend principalement de quatre facteurs :

1° La résistance de l'enroulement induit donne lieu à une perte de tension. Nous verrons plus loin, dans l'étude des canalisations, que cette perte de tension est, pour un courant efficace donné, proportionnelle au cosinus de l'angle de différence de phase du courant et de la tension; elle décroît donc, pour un même courant, lorsque la différence de phase entre le courant et la tension augmente.

Cette perte de tension due à la résistance intérieure est, du reste, assez faible. Elle est comprise, pour les génératrices de courant polyphasé, entre 0,5 et 2,5 pour 100 de la tension aux bornes, pour $\cos\varphi = 1$. Dans les machines puissantes, cette chute de tension est fréquemment inférieure à 1 pour 100. Ce facteur n'a donc qu'une importance secondaire dans la régulation de la tension aux bornes des machines.

2° La réaction d'induit joue un rôle très important dans les génératrices de courant polyphasé. Si le courant induit coïncide en phase avec la tension, il produit simplement une distorsion du champ, dont le résultat est une réduction du champ actif.

Si la phase du courant diffère de celle de la tension, il y a également distorsion du champ, mais il se produit en même temps des ampères-tours directement opposés ou s'ajoutant aux ampères-tours de l'inducteur, suivant que la phase du courant est en retard ou en avance sur celle de la tension.

Si la phase du courant est en retard sur celle de la tension, les deux composantes de la réaction d'induit agissent donc toutes les deux dans le même sens pour réduire le champ et, par suite, la force électromotrice; c'est-à-dire qu'un cou-

Digitized by Google

rant dont la phase est en retard sur celle de la tension produit une plus grande baisse de tension qu'un courant de même moyenne efficace coïncidant en phase avec la force électromotrice.

Si la phase du courant est en avance sur celle de la tension, l'une des composantes produit la distorsion du champ, tendant par suite à réduire la force électromotrice; mais l'autre, s'ajoutant aux ampères-tours inducteurs, tend à renforcer le champ. Ces deux actions peuvent donc, dans certaines conditions, s'équilibrer. Il peut même en résulter un renforcement du champ actif qui permettra, par exemple, de compenser la perte due à la résistance de l'enroulement induit et, par suite, de maintenir constante la tension aux bornes de la génératrice sans modifier l'excitation.

On a proposé, dans ce but, l'emploi de condensateurs, ou de moteurs synchrones surexcités, installés soit sur le lieu de consommation, soit à l'usine génératrice. Nous reviendrons plus tard sur ce sujet.

3° Le degré de saturation des noyaux de fer, principalement de celui de l'inducteur, s'oppose, dans une certaine mesure, aux variations du flux. Pour les inductions adoptées, plus le noyau inducteur est saturé, plus la réluctance est grande. Lorsque la réaction d'induit réduit le flux, la réluctance du fer inducteur diminue; le potentiel magnétique à un pôle augmente et tend, par suite, à réduire l'effet de la réaction d'induit. La saturation du fer inducteur exerce donc une action régulatrice sur la force électromotrice de la machine.

4° Les fuites magnétiques, ou la dispersion magnétique, ont comme résultat qu'une fraction seulement du flux magnétique engendré par l'enroulement inducteur traverse les bobines induites. La dispersion magnétique varie avec la réaction d'induit; elle agit *dans le même sens que cette dernière* au point de vue de la chute de tension.

La prédétermination de l'excitation d'une génératrice de courant polyphasé exige donc, en particulier, la connaissance de la réluctance du noyau inducteur en fonction de l'induction, des fuites magnétiques et de la réaction d'induit.

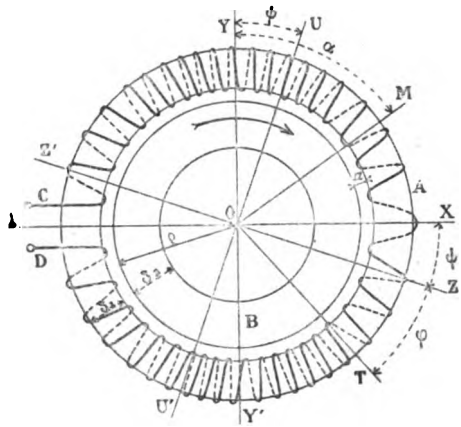
Considérons deux noyaux de fer concentriques A et B

Digitized by Google

(*fig.* 26). Soient ρ le rayon extérieur de B, et a la longueur de l'entrefer. Enroulons sur le noyau A 2N spires distribuées sinusoïdalement, et lançons dans cet enroulement un courant continu I_0 produisant un pôle nord en X et un pôle sud en X'.

Le noyau B est enroulé également en anneau et porte 2Z spires distribuées uniformément en un grand nombre de petites bobines indépendantes. Les groupes de deux bobines

Fig. 26.



situées aux extrémités d'un même diamètre peuvent du reste être connectées en série ou en quantité.

Supposons la dispersion magnétique nulle.

L'inducteur A engendre dans l'entrefer un champ sinusoïdal dont les valeurs maxima sont $+\beta_m$ en X et $-\beta_m$ en X'. Ce champ est nul suivant YY'. Le flux dans les noyaux A, B est nul dans les sections XX', et maximum dans les sections YY'.

En appelant α l'angle que fait une section OM avec OY, la force magnétisante dans cette section, rapportée à 1^{cm} de la périphérie du noyau B, a pour expression

$$(1) \qquad 4\pi \frac{N}{2\rho} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) I_0.$$

Le flux Φ dans une section OM des noyaux est proportionnel

Digitized by Google

à la force magnétisante dans cette section. Le flux Φ est nul dans les sections XX′, où la force magnétisante est nulle, et maximum dans les sections YY′, où la force magnétisante est maximum et égale à $4\pi \frac{N}{2\rho} I_0$.

Nous verrons dans l'étude des moteurs d'induction que, si l'on désigne par $\mathcal{R}$ la réluctance moyenne de chaque circuit magnétique correspondant à deux demi-anneaux, et par $\mathcal{F}$ la force magnétomotrice totale sur cette paire de demi-anneaux engendrant le flux maximum Φ_m, on a

$$\mathcal{F} = \Phi_m \mathcal{R}. \tag{2}$$

Dans le cas présent, on a

$$\mathcal{F} = 4\pi N I_0. \tag{3}$$

Si nous faisons tourner l'anneau B à une vitesse constante, chaque bobine de l'armature engendrera une force électromotrice sinusoïdale dont la fréquence sera égale au nombre de tours par seconde de l'anneau B. Les angles de différence de phase entre ces forces électromotrices sont précisément égaux aux angles compris entre les bobines correspondantes.

Fermons les bobines de l'armature B sur des résistances égales. Chacune de ces bobines sera parcourue par un courant alternatif dont la moyenne efficace sera I_a. Ces courants induits produiront une force magnétomotrice constante, à 90° avec la force magnétomotrice de l'inducteur, et qui déplacera le champ dans le sens du mouvement de rotation, de telle sorte que l'axe du champ dans l'entrefer ne se trouvera plus suivant XX′, mais suivant ZZ′, faisant un angle ψ avec XX′.

Le courant induit a sa valeur maximum $I_a\sqrt{2}$ dans la section OZ et est nul dans la section OU. L'induction dans l'entrefer est nulle dans le plan UU′; elle est maximum dans le plan ZZ′.

Le flux Φ' dans les noyaux est proportionnel à la force magnétisante totale sur les deux anneaux dans la section correspondante. Ce flux est nul dans les sections ZZ′; il a sa

Digitized by Google

valeur maximum Φ'_m dans la section OU; on a

$$\frac{\Phi'_m}{\Phi_m} = \frac{4\pi \frac{N}{2\rho} \cos\psi \, I_0}{4\pi \frac{N}{2\rho} I_0},$$

d'où

$$(4) \qquad \Phi'_m = \Phi_m \cos\psi.$$

La force magnétisante est nulle dans le plan OZ. En la rapportant à 1^{cm} de développement de la périphérie du noyau B, on a

$$4\pi \frac{N}{2\rho} \sin\psi I_0 = 4\pi \frac{Z}{\pi\rho} I_a \sqrt{2},$$

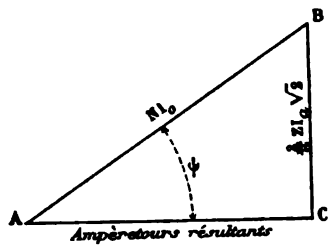
d'où

$$(5) \qquad \sin\psi = \frac{\frac{2}{\pi} Z I_a \sqrt{2}}{N I_0}.$$

Les quantités NI_0 et $\frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}$ sont, au facteur 10 près, égales aux nombres d'ampères-tours sur un demi-anneau inducteur et sur un demi-anneau induit, c'est-à-dire aux nombres d'ampères-tours sur l'inducteur et sur l'induit correspondant à un pôle.

La figure 27 se rapporte au cas que nous venons d'examiner

Fig. 27.



où les courants induits coïncident en phase avec les forces électromotrices. L'hypoténuse AB du triangle ABC représente les ampères-tours sur l'inducteur; le côté BC, les am-

Digitized by Google

pères-tours sur l'induit, et le côté AC les ampères-tours résultants. On voit encore que, si AB représente le champ ou la force électromotrice engendrés par le courant d'excitation I_0, à circuit ouvert, AC représente le champ effectif, ou la force électromotrice induite, lorsque l'armature débite le courant I_a.

La vitesse et l'excitation restant constantes, la force électromotrice de la machine baissera donc dans le rapport AC : AB.

Si l'on veut maintenir constante la force électromotrice de la machine en charge, on devra augmenter le courant d'excitation à circuit ouvert I_0 en lui donnant une valeur I_1 telle que AC soit égal à NI_0; on devra donc avoir

$$NI_1 = \sqrt{NI_0^2 + \left(\frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}\right)^2} \tag{6}$$

ou

$$I_1 = I_0\sqrt{1 + \left(\frac{\frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}}{NI_0}\right)^2}. \tag{7}$$

Fermons maintenant les bobines induites sur des circuits égaux ayant une impédance telle que la phase du courant induit soit retardée d'un angle φ par rapport à la force électromotrice. Le champ maximum dans l'entrefer étant suivant le plan OZ, le courant induit a sa valeur maximum lorsque la bobine traverse le plan OT, faisant un angle φ avec OZ.

La force magnétisante totale dans le plan OZ est nulle :

$$4\pi \frac{N}{2\rho} \sin\psi I_0 - 4\pi \frac{Z}{\pi\rho} I_a\sqrt{2}\cos\varphi = 0, \tag{8}$$

d'où

$$\sin\psi = \frac{\frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}}{NI_0}\cos\varphi. \tag{9}$$

Le flux maximum dans le noyau A se trouve dans la section OU. Sa valeur Φ''_m est proportionnelle à la force magné-

Digitized by Google

tisante totale dans la section considérée; on a donc

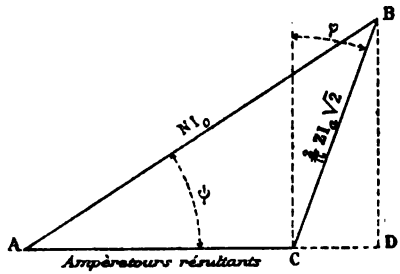
$$\frac{\Phi''_m}{\Phi_m} = \frac{4\pi \frac{N}{2\rho} \cos\psi I_0 - 4\pi \frac{Z}{\pi\rho} I_a \sqrt{2} \sin\varphi}{4\pi \frac{N}{2\rho} I_0}$$

ou

$$(10) \qquad \Phi''_m = \Phi_m \frac{NI_0 \cos\psi - \frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2} \sin\varphi}{NI_0}.$$

Dans la figure 28, le côté AB du triangle ABC représente les ampères-tours sur l'inducteur, BC les ampères-tours sur l'armature, et AC les ampères-tours résultants engendrant le champ effectif. Ou encore, AB étant la force électromotrice engendrée par les ampères-tours NI_0 lorsque l'armature tourne à circuit ouvert, AC représente la force électromotrice

Fig. 28.



lorsque l'armature débite le courant I_a. On a, d'après la figure,

$$(11) \qquad \sin\psi = \frac{BC \cos\varphi}{AB}.$$

On voit immédiatement sur la figure 28 que la réaction d'induit est plus considérable que dans le cas précédent, où le courant induit coïncide en phase avec la force électromotrice.

Si l'on veut que la force électromotrice de la machine soit la même en charge qu'à circuit ouvert, il faudra donner au courant d'excitation une valeur I_1, plus élevée, telle qu'on ait

$$AC = NI_0$$

Digitized by Google

et, par suite,

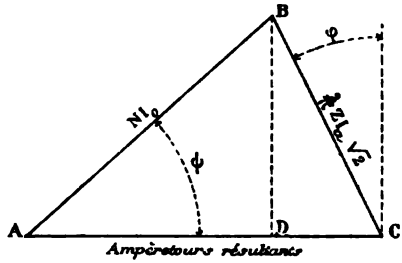
$$(12)\qquad NI_1 = \sqrt{\overline{NI_0}^2 + \overline{\frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}}^2 + 2 . NI_0 . \frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}\sin\varphi}\,.$$

ou

$$(13)\qquad I_1 = I_0\sqrt{1 + \left(\frac{\frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}}{NI_0}\right)^2 + 2\,\frac{\frac{2}{\pi} ZI_a\sqrt{2}}{NI_0}\sin\varphi}.$$

La figure 29 se rapporte au cas où le courant induit a sa phase en avance sur celle de la force électromotrice. L'angle φ est alors négatif.

Fig. 29.



On voit qu'en donnant à l'angle φ une valeur convenable, on peut rendre les ampères-tours résultants AC égaux, et même supérieurs, aux ampères-tours inducteurs AB, c'est-à-dire obtenir un compoundage ou un surcompoundage de la machine.

Si l'on veut, par exemple, que la force électromotrice en charge soit égale à la force électromotrice à vide, pour un même courant d'excitation et une même vitesse, on devra avoir

$$AC = AB$$

ou

$$(14)\qquad \varphi = \frac{\psi}{2}.$$

Or

$$\sin\psi = 2\sin\frac{\psi}{2}\cos\frac{\psi}{2},$$

Digitized by Google

d'où

$$\cos\varphi = \cos\frac{\psi}{2} = \frac{\sin\psi}{2\sin\frac{\psi}{2}}. \tag{15}$$

On a, en vertu des relations (9) et (15)

$$\frac{\sin\psi}{\cos\varphi} = 2\sin\frac{\psi}{2} = \frac{\frac{2}{\pi}ZI_a\sqrt{2}}{NI_0}$$

d'où

$$\sin\varphi = \frac{1}{2}\,\frac{\frac{2}{\pi}ZI_a\sqrt{2}}{NI_0}. \tag{16}$$

Remarque. — Si l'armature est enroulée en tambour, Z indique le nombre de conducteurs induits par pôle, ou le nombre de spires par paire de pôles.

N désigne le nombre de spires par paire de pôles inducteurs.

Dans l'hypothèse que nous avons faite de vitesse constante et *de dispersion magnétique nulle,* nous avons considéré une série de rapports K des ampères-tours inducteurs engendrant la force électromotrice normale, l'induit étant à circuit ouvert, aux ampères-tours totaux sur l'induit pour le courant normal, et nous avons calculé, pour chaque valeur de K, et pour une série de valeurs de l'angle de retard de phase φ du courant par rapport à la tension aux bornes, la réduction que subit la force électromotrice lorsque la machine débite le courant normal, l'excitation restant invariable. Les résultats du calcul sont consignés dans le Tableau ci-dessous.

RAPPORT K.	RÉDUCTION DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE EN POUR 100.				
	$\cos\varphi = 1.$	$\cos\varphi = 0,9.$	$\cos\varphi = 0,8.$	$\cos\varphi = 0,7.$	$\cos\varphi = 0.$
1,5	25,5	49	55	59	67
2	13,4	32,5	38	41,6	50
3	5,7	20	24	26	33
4	3,0	15,5	17	19	25
5	2,0	10	13	15	20

Digitized by Google

Le Tableau suivant indique le rapport des ampères-tours inducteurs produisant la *force électromotrice* normale lorsque l'armature débite le *courant de régime* aux ampères-tours inducteurs à vide. Ce rapport est également celui du courant d'excitation en charge à celui à circuit ouvert engendrant la même force électromotrice.

RAPPORT K.	RAPPORT $\frac{NI_1}{NI_0}$.				
	$\cos\varphi = 1.$	$\cos\varphi = 0,9.$	$\cos\varphi = 0,8.$	$\cos\varphi = 0,7.$	$\cos\varphi = 0.$
1,5.....	1,20	1,41	1,50	1,54	1,67
2.....	1,12	1,30	1,36	1,40	1,50
3.....	1,05	1,18	1,23	1,25	1,33
4.....	1,03	1,13	1,17	1,19	1,25
5.....	1,02	1,10	1,13	1,17	1,20

On voit aisément que la fraction des rapports contenus dans ce dernier Tableau indique l'accroissement qu'éprouve la force électromotrice si, la machine étant en charge et excitée de façon à produire la force électromotrice normale, on vient à supprimer la charge sur l'armature, en maintenant la vitesse et l'excitation constantes.

Dans les machines bien établies, la chute de tension produite par le courant normal, la vitesse et l'excitation à circuit ouvert restant invariables, est d'environ 5 à 10 pour 100 pour $\cos\varphi = 1$, lorsque les circuits récepteurs sont constitués uniquement par des lampes à incandescence, par exemple; elle atteint une valeur triple ou quadruple pour $\cos\varphi = 0,7$.

L'étude qui précède est basée sur l'hypothèse d'une distribution sinusoïdale des ampères-tours induits et inducteurs, d'une dispersion magnétique nulle, et d'une perméabilité des noyaux de fer constante, indépendante de la valeur de l'induction.

Dans la pratique, la distribution des ampères-tours inducteurs diffère de celle admise. Dans le cas d'une machine à courant alternatif simple, la répartition des ampères-tours induits ne concorde pas non plus avec l'hypothèse ci-dessus.

Digitized by Google

Les conditions de régulation de la tension aux bornes conduisent en général à adopter pour le noyau de fer de l'inducteur une induction élevée, de telle sorte que la perméabilité du circuit magnétique varie considérablement avec le flux qui traverse ce circuit.

Enfin, la dispersion magnétique, qu'il est fort difficile d'évaluer par un calcul direct, joue un rôle très important.

La prédétermination tant de la chute de tension produite par une charge donnée, et pour une excitation déterminée, que de l'excitation nécessaire pour obtenir une tension donnée aux bornes d'une machine pour une charge déterminée, exige donc la connaissance d'un certain nombre d'éléments qui doivent être établis expérimentalement.

Nous ne connaissons du reste pas de méthode fournissant des solutions très exactes de ces deux problèmes. Nous allons exposer deux méthodes approchées : celle de M. Behn-Eschenburg et celle de M. Rothert avec la modification de M. Heyland.

Méthode de M. Behn-Eschenburg. — La chute de tension dans une machine pour une charge donnée est la différence entre la tension aux bornes de la machine à circuit ouvert et la tension aux bornes de l'armature lorsque celle-ci est parcourue par un courant correspondant à la charge considérée et ayant une différence de phase donnée avec la tension aux bornes, la vitesse et l'excitation demeurant constantes.

Cette chute de tension est généralement déterminée par les trois facteurs suivants :

1° La résistance de l'induit;

2° La self-induction de l'armature;

3° La réaction des courants de Foucault induits principalement dans la masse de fer de l'inducteur.

Ces trois facteurs peuvent être considérés comme engendrant trois forces électromotrices présentant certaines différences de phase et qui, combinées avec la force électromotrice de la machine, produisent la tension aux bornes.

Ces trois forces électromotrices sont proportionnelles au courant de charge, et peuvent être représentées, en grandeur et en phase, par le diagramme polaire connu.

Digitized by Google

Considérons, pour simplifier cet exposé, le cas d'une machine à courant alternatif simple, et soient (*fig.* 30) :

E_1 la tension aux bornes de la machine;

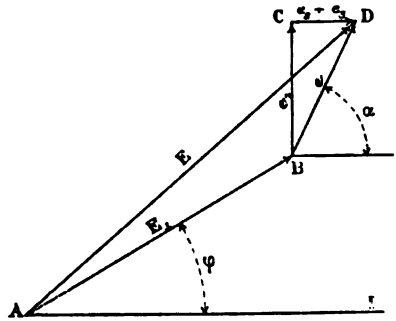
I le courant dans l'armature présentant une différence de phase φ avec la tension E_1;

e_1 la force électromotrice de self-induction;

e_2 la chute de tension produite par la résistance r de l'armature;

e_3 la chute de tension produite par les courants de Foucault.

Fig. 30.



Dans le cas d'une distribution d'énergie à des lampes à incandescence, avec transformateurs, l'angle φ est très petit, voisin de 10°; on peut alors admettre sensiblement $\cos\varphi = 1$. Dans le cas d'une distribution à des moteurs d'induction, on a en moyenne $\cos\varphi = 0,80$ et, par suite, l'angle φ est voisin de 37°.

L'angle de différence de phase de la force électromotrice de self-induction e_1 et du courant I est égal à $\frac{\pi}{2}$; e_2 et e_3 coïncident en phase avec le courant I.

La puissance aux bornes de la machine à courant alternatif est

$$P = E_1 I \cos\varphi. \tag{1}$$

Les trois forces électromotrices e_1, e_2, e_3 ont une résultante e dont la différence de phase par rapport à I est α. e re-

Digitized by Google

présente la force contre-électromotrice totale de l'armature en charge.

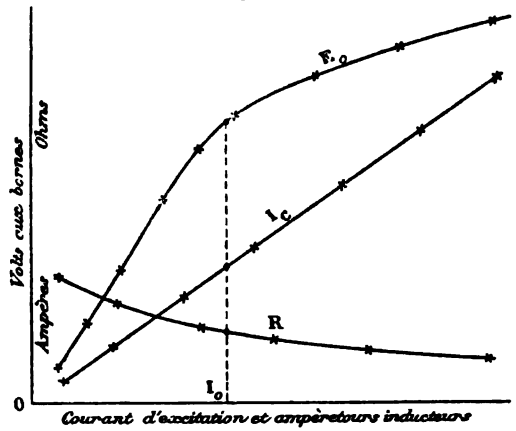
L'impédance, ou résistance apparente de la machine, est donc

$$R = \frac{e}{I}. \tag{2}$$

Déterminons tout d'abord la *caractéristique à vide* de la machine, c'est-à-dire la courbe représentant la tension aux bornes de l'armature à circuit ouvert en fonction du courant d'excitation, ou des ampères-tours d'excitation pour la vitesse normale.

A cet effet, la machine étant maintenue à une allure voi-

Fig. 31.



sine de la vitesse normale, on donne successivement au courant d'excitation une série de valeurs en notant chaque fois la tension aux bornes, ainsi que le nombre de tours par minute correspondant.

En multipliant les tensions notées par le rapport des nombres de tours par minute normaux aux nombres de tours par minute mesurés, on obtient une série de valeurs de la tension aux bornes de la machine pour la vitesse normale, et correspondant aux valeurs choisies du courant d'excitation. On obtient ainsi la caractéristique E_0 de la machine à circuit ouvert (*fig.* 31).

Digitized by Google

Fermons maintenant l'armature en court-circuit en réunissant directement les bornes de la génératrice par un ou plusieurs ampèremètres, suivant que la machine est à courant alternatif ou à courant polyphasé. La vitesse de la machine étant maintenue dans le voisinage de la normale, faisons varier le courant d'excitation, et notons chaque fois la valeur correspondante du courant de court-circuit. Nous obtenons ainsi une courbe I_c (*fig.* 31). Cette caractéristique est sensiblement une ligne droite, sauf pour les valeurs élevées de l'induction, pour lesquelles elle devient une courbe légèrement concave vers l'axe des abscisses par suite de la saturation des passages entre les dents, et pour les très petites valeurs de l'excitation; grâce au magnétisme rémanent, cette ligne coupe l'axe des ordonnées au-dessus de l'axe des abscisses. Des écarts de 30 pour 100 et même de 50 pour 100 par rapport à la vitesse normale n'ont à peu près aucune influence sur la valeur du courant de court-circuit.

La résistance de l'ampèremètre étant pratiquement nulle, la force électromotrice engendrée est absorbée entièrement à l'intérieur de l'armature. Pour chaque valeur du courant d'excitation I_0, on a une force électromotrice e définie par la caractéristique à vide E_0 et un courant de court-circuit I_c.

On a

$$e = R\,I_c,$$

d'où

$$R = \frac{e}{I_c}. \tag{3}$$

En portant en ordonnées les valeurs de R correspondant à une série de courants d'excitation, on obtient une courbe R représentant les valeurs successives de l'impédance de la machine (*fig.* 31).

Les trois courbes, avec le diagramme de la figure 30, permettent de déterminer approximativement, pour un courant d'excitation I_0 et une vitesse constante, quelle sera la chute de tension produite par un courant induit I différant en phase d'un angle φ avec la tension aux bornes.

En général, les quantités e_2 et e_3 sont petites par rapport à e_1 et peuvent être négligées. Si l'on veut en tenir compte,

Digitized by Google

$e_2 = rI$ se déduit immédiatement de la résistance de l'armature; e_3 peut être déterminé expérimentalement. Si l'on veut éviter cette recherche, on peut admettre approximativement que l'on a

$$e_2 + e_3 = 3e_2$$

Les quantités E, e et φ sont connues. La force électromotrice de self-induction e_1 est déterminée par la relation

$$(4) \qquad e_1 = \sqrt{e^2 - (e_2 + e_3)^2},$$

qui définit le triangle BCD et, par suite, l'angle α; on a

$$(5) \qquad \sin\alpha = \frac{e_1}{e}$$

et

$$(6) \qquad \cos(\alpha - \varphi) = \frac{E^2 - E_1^2 - e^2}{2E_1 e}$$

ou sensiblement

$$(7) \qquad E_1 = E - e\cos(\alpha - \varphi) - \frac{1}{2}\frac{e^2 \sin^2(\alpha - \varphi)}{E}.$$

Si $e_2 + e_3$ est négligeable vis-à-vis de e_1 on a sensiblement

$$\alpha = \frac{\pi}{2}$$

et, d'après (6),

$$(8) \qquad \sin\varphi = \frac{E^2 - E_1^2 - e^2}{2E_1 e}.$$

On a alors pour les cas extrêmes $\varphi = 0$ et $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$(9) \qquad \varphi = 0 \qquad E_1 = \sqrt{E^2 - e^2},$$

$$(10) \qquad \varphi = \frac{\pi}{2} \qquad E_1 = E - e.$$

Voici les résultats d'une étude de M. Behrend sur une

Digitized by Google

machine à courant triphasé à fer tournant, dont la résistance de chaque section d'armature est 0,07 ohm :

COURANT d'excitation.	FORCE électromotrice.	COURANT de court-circuit.
ampères	volts	ampères
1,5	33,5	32
2,2	45,5	45
4,2	69	89
4,45	71	94
6,7	84,5	143

1° Avec un courant d'excitation de 4,45 ampères, donnant une force électromotrice de 71 volts et un courant de court-circuit de 94 ampères, on obtint, pour une charge non inductive de 32 ampères, une tension aux bornes, mesurée, de 63,5 volts. La chute de tension par résistance ohmique est 2,25 volts. En appliquant la méthode Behn-Eschenburg on trouve pour la force électromotrice de self-induction

$$71 \times \frac{32}{94} = 24,17$$

et pour la tension aux bornes 65 volts au lieu de 63,5 volts mesurés.

2° Pour un courant d'excitation de 6,7 ampères et une charge à peu près complètement inductive de 45 ampères, la tension aux bornes, mesurée, est 59 volts. La méthode Behn-Eschenburg donne très approximativement pour la tension aux bornes, en se reportant au Tableau ci-dessus :

$$84,5 - 84,5 \frac{45}{143} = 57,9 \text{ volts}$$

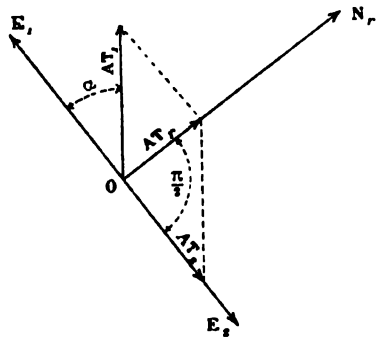
au lieu de 59 mesurés.

Inversement, s'il s'agit de trouver le courant d'excitation pour une puissance $E_1 I \cos\varphi$, E_1, I et φ étant connus, on détermine successivement $e = RI$, puis la force électromotrice E_0 à circuit ouvert qui, à l'aide de la caractéristique à vide, détermine le courant d'excitation cherché.

Digitized by Google

Méthode de M. Rothert. — La figure 32 est un diagramme relatif à un transformateur travaillant sur un circuit non inductif et dans lequel la dispersion est supposée nulle. Les ampères-tours primaires AT_1 et les ampères-tours secondaires AT_2 ont une résultante AT_r qui produit le flux effectif N_r. Ce flux N_r est en quadrature avec les forces élec-

Fig. 32.



tromotrices E_1 et E_2, et coïncide en phase avec les ampères-tours résultants AT_r qui l'engendrent.

Considérons maintenant une machine à courant triphasé. Supposons le courant sinusoïdal, les ampères-tours répartis sinusoïdalement, la perméabilité du fer constante, la dispersion nulle, et admettons que les forces magnétomotrices des trois sections de l'induit se composent suivant le parallélogramme et produisent un champ tournant avec la même vitesse que le champ inducteur. Les trois bobines d'armature à 120° donnent un nombre d'ampères-tours égal au nombre de spires d'une bobine multiplié par le courant efficace, par $\sqrt{2}$ et par 1,5.

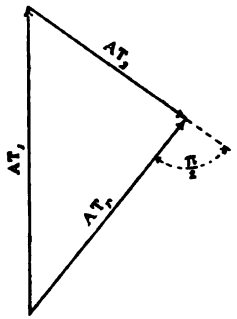
Le produit de ces quatre facteurs est le nombre d'ampères-tours AT_2 sur l'armature.

Le diagramme de la figure 33 se rapporte à une machine fonctionnant sur un circuit sans inductance ni capacité, c'est-à-dire pour lequel on a $\cos\varphi = 1$. Les ampères-tours d'excita-

Digitized by Google

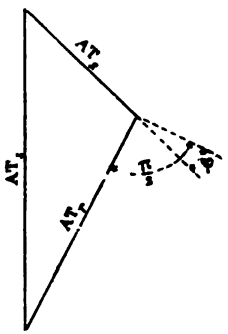
tion AT_1 et les ampères-tours d'armature AT_2 ont une résultante AT_r qui engendre le flux.

Fig. 33.



La figure 34 est le diagramme des ampères-tours dans le cas où le courant induit présente un retard de phase φ par rapport à la tension aux bornes.

Fig. 34.



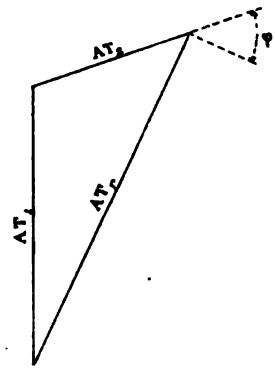
La figure 35 se rapporte au cas où le courant induit est en avance sur la tension aux bornes.

Enfin la figure 36 est le diagramme général donnant les ampères-tours résultants AT_r lorsque, les ampères-tours d'excitation AT_1 et les ampères-tours d'armature AT_2 étant con-

Digitized by Google

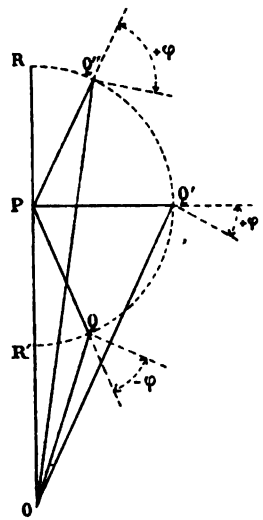
stants, on fait varier l'angle φ de différence de phase entre le courant induit et la tension aux bornes de $\frac{\pi}{2}$ à $-\frac{\pi}{2}$. OP re-

Fig. 35.



présente les ampères-tours d'excitation AT_1. Le rayon PR

Fig. 36.



du demi-cercl Q'R' représente en grandeur les ampères-

Digitized by Google

tours d'armature AT_2. Les vecteurs OQ, OQ′, OQ″ mesurent les ampères-tours résultants engendrant le flux effectif.

Si l'on considère la dispersion magnétique, on voit que les ampères-tours d'excitation engendrent un flux dont une partie ne traverse pas l'enroulement induit. De même les ampères-tours d'armature produisent une force magnétomotrice qui se combine avec celle de l'inducteur en une quantité AT_r qui engendre le flux principal commun traversant les deux systèmes. Les ampères-tours AT_1 et AT_2 agissent sur le même circuit magnétique. La force magnétomotrice AT_2 de l'armature engendre encore un flux de dispersion n_2 qui ne dépend, pour la machine considérée, que de AT_2 et qui a la direction de AT_2 dans le diagramme.

Caractéristique en court-circuit. — Si l'on désigne par I_{c2} le courant d'armature lorsque deux seulement des trois bornes sont mises en court-circuit (montage en étoile), et par I_{c3} le courant à chacune des trois bornes mises en court-circuit, l'excitation étant la même dans les deux cas, on a, d'après M. Rothert,

$$\frac{I_{c3}}{I_{c2}} = \frac{1,56}{2,12} = 0,736.$$

Méthode de M. Heyland. — Cette méthode est un perfectionnement de la précédente. Nous allons l'exposer en citant une application qui en a été faite par son auteur à une machine à courant triphasé de 750 kilowatts donnant une tension de 2200 volts aux bornes. Le courant à une borne est 200 ampères, le nombre de tours par minute 94, et la fréquence 50 périodes par seconde.

L'induit, extérieur, est fixe. Le noyau a un diamètre intérieur de 6000^{mm} et une longueur axiale de 250^{mm}. L'enroulement, en tambour, est logé dans des cannelures fermées, au nombre de 6 par pôle.

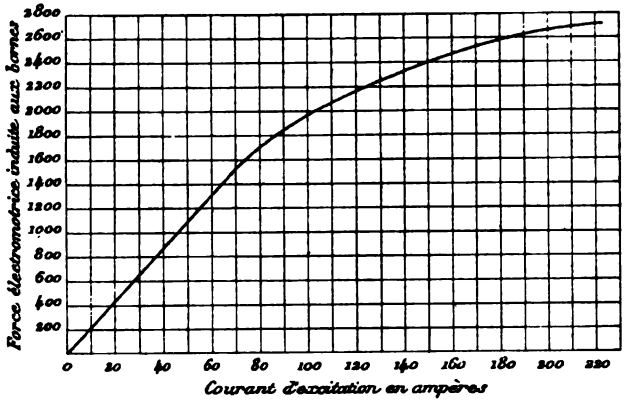
L'inducteur, mobile, a 64 pôles d'acier massif. L'entrefer est de 10^{mm}.

Le courant d'excitation nécessaire pour produire 2200 volts à vide est 127,5 ampères à 70 volts, soit environ 9 kilowatts ou 1,2 pour 100 de la puissance normale aux bornes.

Digitized by Google

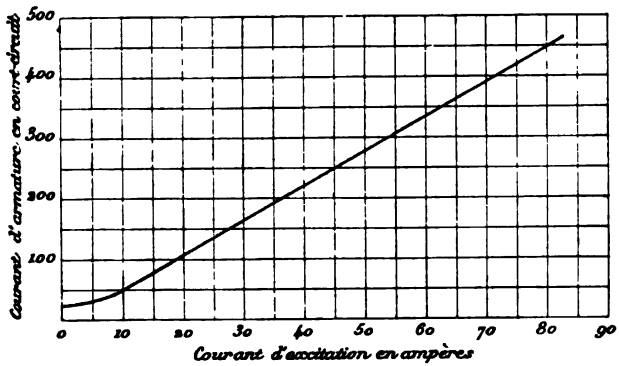
Les figures 37 et 38 représentent la caractéristique à vide et la caractéristique en court-circuit de cette machine, établies expérimentalement.

Fig. 37.



La tension aux bornes d'une machine en court-circuit est naturellement nulle, et, par suite de la faible résistance de

Fig. 38.



l'enroulement induit, la force électromotrice nécessaire pour engendrer le courant de pleine charge en vainquant la résistance ohmique est extrêmement faible. En conséquence, le

Digitized by Google

courant parcourant l'enroulement induit est pratiquement sans puissance, et, pour un nombre donné d'ampères-tours d'excitation, il atteint une valeur telle qu'il produit un flux d'armature opposé et équivalent qui équilibre le flux produit par les ampères-tours d'excitation.

Le courant de court-circuit, pour une excitation donnée, dépend en partie des dimensions et de la forme des pièces polaires, ainsi que des fuites magnétiques. Nous avons déjà vu que la caractéristique en court-circuit est sensiblement une ligne droite.

La résultante du flux imprimé, dû aux ampères-tours d'excitation, et du flux opposé, dû aux ampères-tours de réaction d'armature, est le flux réel existant dans le fer de l'armature et engendrant le courant de court-circuit. Sa valeur est naturellement faible. Ce flux peut être considéré comme composé de deux flux en quadrature : l'un, très petit, correspond à la faible force électromotrice nécessaire pour produire le courant de court-circuit contre la résistance ohmique de l'enroulement; l'autre, plus considérable, correspond à la force électromotrice inductive : c'est le flux de dispersion de l'armature.

Il n'est pas nécessaire, pour une machine donnée, de connaître séparément les fuites magnétiques de l'inducteur, celles-ci étant comprises implicitement dans la courbe d'aimantation, ou caractéristique à vide, et étant présentes sensiblement en même quantité à charge nulle. Mais, pour déterminer quel est l'accroissement d'excitation nécessaire en passant de la charge nulle à la pleine charge, il importe de connaître la quantité de flux dispersé dans l'armature. Comme les fuites magnétiques dans l'induit croissent avec le courant d'armature, ces fuites exigent naturellement un accroissement de l'excitation, si l'on veut maintenir constante la tension aux bornes.

La détermination expérimentale de la quantité de flux dispersé a été effectuée de la manière suivante, le flux dispersé étant exprimé en fonction de la force électromotrice lui correspondant.

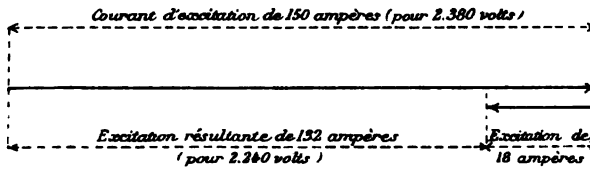
La machine a été chargée à 100 ampères à chaque borne sur un circuit complètement inductif. La tension aux bornes

Digitized by Google

était alors 2140 volts et le courant d'excitation 150 ampères. La force électromotrice correspondant à ce courant d'excitation est, d'après la caractéristique à vide, 2380 volts; c'est la force électromotrice qui serait réellement engendrée dans l'enroulement induit si l'armature ne débitait aucun courant. La charge extérieure étant, pratiquement, uniquement inductive, l'excitation pour la force électromotrice induite est la somme des excitations pour la tension aux bornes et pour la force électromotrice inductive de l'armature. Dans le cas actuel, la force électromotrice induite est 2380 volts, la tension aux bornes 2140 volts. Le courant d'excitation correspondant à la force électromotrice de dispersion est donné comme suit :

La caractéristique en court-circuit montre que, pour produire un courant d'armature de 100 ampères à une borne, il faut un courant d'excitation de 18 ampères. La différence entre les deux courants d'excitation est 150 — 18 = 132 ampères (*fig.* 39), correspondant à une force électromotrice

Fig. 39.



induite de 2240 volts. La différence

$$2240 - 2140 = 100 \text{ volts}$$

représente les fuites d'armature, soit 4,5 pour 100 de la tension de 2240 volts aux bornes. La dispersion, ou fuites d'armature, étant proportionnelle au courant induit, la tension pour un courant d'armature de 200 ampères serait 200 volts.

A l'aide de ces données et des diagrammes suivants, on peut déterminer la réduction du flux magnétique coupant les conducteurs de l'armature, ce qui donnera la chute de tension dans la machine.

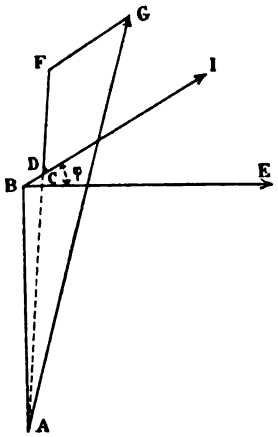
Dans la figure 40, AB représente le flux correspondant à la tension de 2200 volts aux bornes à charge nulle. La phase de la tension E est naturellement à angle droit avec AB. La

Digitized by Google

différence de phase entre le courant induit I et la tension E est φ. Dans le cas considéré, on a $I = 200$ ampères; posons $\cos\varphi = 0,85$.

AB représentant le flux effectif, nous devons lui ajouter le flux de dispersion BC de l'armature, correspondant à 200 volts déterminés précédemment, et un très petit flux CD perpen-

Fig. 40.



diculaire à I, correspondant à la chute de tension par résistance ohmique de l'armature, soit 44 volts. Le flux total donnant la tension E est donc AD au lieu de AB.

Le flux AD correspond à une force électromotrice induite de 2350 volts, et exige un courant d'excitation de 145 ampères, d'après la caractéristique à vide. Ajoutons le courant d'excitation FG de 36 ampères, pour la réaction du courant induit de 200 ampères d'après la caractéristique en court-circuit, en phase avec le courant induit. Le courant d'excitation total est AG = 168 ampères correspondant à une force électromotrice induite, à vide, de 2500 volts.

Cette machine a donc, pour un courant de 200 ampères à chaque borne et pour $\cos\varphi = 0,85$, une chute de tension de 300 volts, soit 12 pour 100.

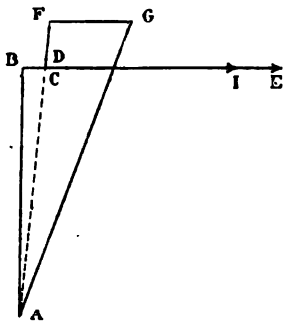
Cette faible chute de tension est due à la forte saturation des noyaux inducteurs.

Digitized by Google

La figure 41 se rapporte au cas où la machine a une charge non inductive, le courant induit I étant en phase avec la tension E aux bornes.

Le flux nécessaire pour produire la tension de 2200 volts aux bornes à vide est AB, représentant également 2200 volts. Le flux de dispersion de l'armature pour un courant induit de 200 ampères est BC, coïncidant en phase avec le courant I, et représentant également 200 volts. Le flux d'armature correspondant à la chute ohmique de 44 volts est CD, perpendicu-

Fig. 41.



laire à I. Le flux total est AD, correspondant, d'après la caractéristique à vide, à un courant d'excitation de 132,5 ampères. La réaction du courant induit de 200 ampères est représentée par FG égal à 36 ampères, coïncidant en phase avec I. Le courant d'excitation total est AG = 141 ampères, correspondant à une force électromotrice induite, à vide, de 2315 volts.

La chute de tension produite par une charge non inductive de 200 ampères à chaque borne, à vitesse et excitation constantes, est ainsi trouvée égale à 5 pour 100.

§ III. — Puissance et rendement d'une machine a courant polyphasé.

La puissance d'une génératrice est limitée principalement par les conditions mécaniques, par l'échauffement de ses diverses parties, et par la réaction d'induit.

Digitized by Google

Si l'on désigne par

D le diamètre du noyau induit à l'extrémité des dents, en centimètres;

L la longueur axiale de ce noyau, en centimètres;

N le nombre de tours par minute,

la puissance P de cette machine, en kilowatts, peut être exprimée par la formule empirique

$$P = K.D^2LN,$$

K étant un coefficient numérique. Ce coefficient n'est pas constant, et dépend de la construction de la machine. Il varie généralement entre $0,7 \times 10^{-6}$ pour les petites machines et $1,3 \times 10^{-6}$ pour les génératrices de plusieurs milliers de kilowatts. Pour les machines de 1000 kilowatts on peut admettre

$$K = 1 \times 10^{-6}.$$

Voici, à titre d'indication, quelques données fréquemment adoptées dans la construction des génératrices :

Vitesse périphérique de l'inducteur, en mètres par seconde.	20 à 40
Densité de courant dans l'enroulement induit, en ampères par millimètre carré	1,75 à 3
Densité de courant dans l'enroulement inducteur, en ampères par millimètre carré	1,25 à 2
Induction dans la fonte, en kilogauss	6 à 8
Induction dans l'acier et le fer forgé, culasse et noyaux polaires, en kilogauss	14 à 15
Induction dans le noyau d'armature, en kilogauss	5 à 6
Induction dans l'entrefer, en regard des faces polaires, en kilogauss	8 à 9

L'induction dans le noyau d'armature dépend essentiellement de la fréquence. Les nombres indiqués s'appliquent à des fréquences voisines de 50 périodes par seconde.

Dans les génératrices à inducteur intérieur mobile, dont la vitesse périphérique est élevée, la ventilation est très active. C'est donc la réaction d'armature plutôt que l'échauffement qui limite la puissance de ces machines.

Digitized by Google

Nous avons vu que la réaction d'induit est intimement liée à la caractéristique en court-circuit. Dans les génératrices bien établies, à moins de conditions spéciales, le courant de court-circuit, pour l'excitation à pleine charge, est égal à trois ou quatre fois, et même cinq fois le courant à pleine charge.

Rendement. — Appelons

P la puissance aux bornes de la génératrice;

P_c la perte de puissance dans l'enroulement de l'armature;

P_h la perte de puissance dans le noyau de l'armature, par hystérésis et courants de Foucault;

P_e la puissance absorbée par l'excitation;

P_m la puissance absorbée par les frottements mécaniques divers et par la ventilation.

Le rendement de la machine est

$$\eta = \frac{P}{P + P_c + P_h + P_e + P_m}.$$

Le rendement d'une génératrice de courant triphasé de 100 kilowatts est d'environ 90 pour 100. Le rendement total d'une génératrice de courant triphasé de 1000 kilowatts atteint en général 92 à 93 pour 100, et le rendement électrique, pertes mécaniques à part, environ 96 pour 100.

Fréquence. — En désignant par p le nombre de paires de pôles nord et sud d'une génératrice, et par N le nombre de tours par minute, la fréquence est

$$n = p\frac{N}{60}.$$

§ IV. — Excitation et réglage de la tension des génératrices.

On détermine l'excitation d'une génératrice à circuit ouvert en calculant successivement les ampères-tours correspondant à la culasse, aux noyaux polaires, à l'entrefer et au noyau d'armature.

Digitized by Google

Pour une charge donnée, on détermine les ampères-tours d'excitation à l'aide de l'une des méthodes que nous avons exposées précédemment.

L'excitation des génératrices s'effectue principalement de trois manières :

1° Chaque génératrice est munie de son excitatrice qu'elle actionne directement, l'induit de l'excitatrice étant calé sur un prolongement de l'arbre de la génératrice, soit encore par courroie ou engrenages.

2° Une ou plusieurs excitatrices, actionnées par des moteurs indépendants, et accouplées en quantité, fournissent le courant d'excitation à toutes les génératrices.

3° Le courant continu pour l'excitation est fourni par un convertisseur, ou par une dynamo mue par un moteur à courant polyphasé, synchrone ou asynchrone.

Le premier dispositif présente une certaine simplicité, puisque le même moteur fait mouvoir en même temps la génératrice et son excitatrice, mais il a le défaut que l'excitatrice subit toutes les variations de vitesse de la génératrice, qui peuvent elles-mêmes faire varier dans de fortes proportions la tension fournie par l'excitatrice, et *a fortiori* la tension aux bornes de la génératrice.

Si les génératrices doivent fonctionner en parallèle, on accouple également les excitatrices en quantité.

La seconde méthode est employée généralement dans les installations importantes comportant un grand nombre de génératrices. Une ou deux excitatrices, complétées par une de réserve, sont capables d'exciter simultanément toutes les génératrices, et sont actionnées chacune par un moteur spécial. Les excitatrices, shunt, ont un rhéostat de champ pour le réglage de la tension du courant d'excitation. Un rhéostat, en série avec l'inducteur de chaque génératrice, permet de régler l'excitation de chaque machine. Une commande commune à tous ces rhéostats permet le réglage simultané de l'excitation de toutes les génératrices.

Enfin, l'excitation peut être produite par une dynamo actionnée par un moteur à courant polyphasé, synchrone ou asynchrone, ou par un convertisseur. Dans ce cas, l'une des génératrices doit être amorcée préalablement en l'excitant

Digitized by Google

soit au moyen d'une excitatrice spéciale, soit à l'aide d'une batterie d'accumulateurs.

L'auteur a utilisé à cet effet le convertisseur lui-même. Celui-ci, muni d'un tambour, est monté sur une glissière sur laquelle il peut être déplacé, au moyen d'une vis avec volant à main, de façon que le tambour vienne embrayer avec la jante du volant de la machine à vapeur commandant la génératrice. Le convertisseur fonctionne alors comme dynamo. Une fois l'amorçage effectué, on lance le courant triphasé dans le convertisseur qu'on écarte du volant.

La chute de tension d'une génératrice alimentant des moteurs d'induction, en passant de la charge nulle à la pleine charge, étant toujours assez importante, on a cherché à obtenir un réglage automatique de la tension aux bornes.

On a essayé de compounder les génératrices en redressant une partie soit de l'un des courants, soit de tous les courants composant le courant polyphasé, directement ou par l'intermédiaire d'un transformateur. Le courant, ou les courants ainsi redressés, passent dans un enroulement supplémentaire de l'inducteur. Ce procédé, qui présente quelques difficultés, permettrait d'obtenir un assez bon réglage de la tension si le courant induit et la tension coïncidaient toujours en phase. Cette condition n'étant pas remplie dans le cas d'une distribution d'énergie à des moteurs d'induction, ce réglage, fourni par un nombre d'ampères-tours supplémentaires d'excitation proportionnel au courant d'armature, est insuffisant : en outre, le redressement du courant devient fort difficile.

Nous avons vu, pages 52 et 53, qu'il est possible de réduire, d'annuler la réaction d'induit, et même d'accroître la tension aux bornes d'une génératrice, en donnant au courant induit une avance de phase convenable par rapport à la tension aux bornes. Ce résultat peut être obtenu en employant un certain nombre de moteurs synchrones surexcités qui produisent la composante en avance nécessaire. Nous verrons plus loin comment, dans certains cas, on a combiné cette action avec la réaction de la ligne pour obtenir un réglage automatique de la tension.

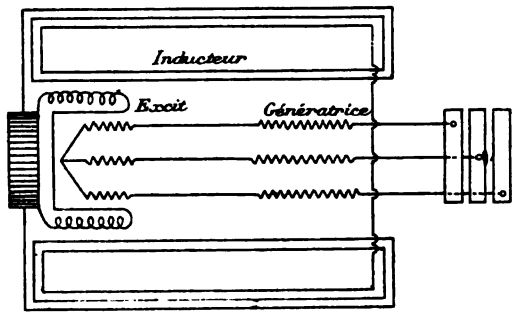
Danielson munit l'armature de l'excitatrice d'un second enroulement qui reçoit le courant polyphasé, comme un mo-

Digitized by Google

teur synchrone, de telle façon que cette excitatrice tourne synchroniquement avec la génératrice. La figure 42 représente schématiquement l'armature de la génératrice et celle de l'excitatrice calées sur le même arbre et ayant un inducteur commun.

L'enroulement auxiliaire de l'excitatrice est en sens inverse de celui de la génératrice, de façon qu'il agisse en sens contraire sur le champ de l'excitatrice, c'est-à-dire qu'il renforce le champ de cette dernière lorsque le courant induit réduit le

Fig. 42.



champ de la génératrice. Cet enroulement auxiliaire accroît donc d'autant plus le champ de l'excitatrice que la phase du courant de la génératrice est plus en retard sur celle de la tension, et inversement.

L'enroulement auxiliaire de l'excitatrice peut être alimenté par le secondaire d'un transformateur dont le primaire est en série avec les conducteurs partant des bornes de la génératrice.

Danielson a trouvé par expérience qu'on obtenait un meilleur réglage en calant l'enroulement de la génératrice et l'enroulement auxiliaire de l'excitatrice à 170° au lieu de 180° l'un de l'autre.

La *General Electric Company* construit des génératrices compensées, à courant polyphasé ou alternatif, établies sur un principe analogue.

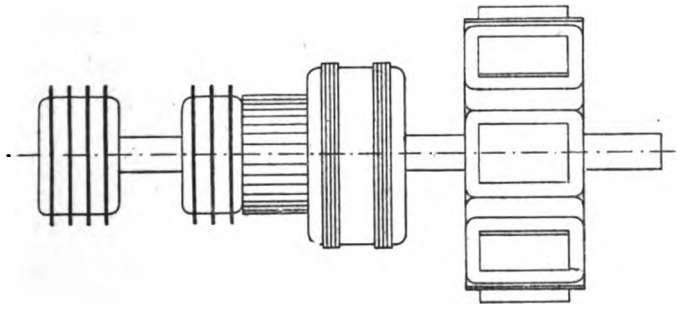
La machine de 75 kilowatts fait 900 tours par minute et donne une fréquence de 60 périodes par seconde.

Digitized by Google

L'inducteur, mobile à l'intérieur de l'induit, porte 8 noyaux polaires de tôle, fixés par queue d'aronde dans des logements du tourteau d'acier calé sur l'arbre. L'induit, extérieur, est formé d'un anneau de tôle muni de cannelures dans lesquelles on fixe, au moyen de coins de bois, les bobines induites construites sur forme.

L'arbre de la génératrice porte encore l'induit de l'excitatrice avec son collecteur, deux bagues pour la prise du courant d'excitation de la génératrice, ainsi qu'un collecteur à trois bagues.

Fig. 43.



Le courant induit de la génératrice traverse l'enroulement primaire d'un transformateur dont les bornes secondaires sont réliées aux balais du collecteur à trois bagues. Celles-ci sont connectées à un enroulement auxiliaire porté par l'induit de l'excitatrice.

L'inducteur de l'excitatrice est excité en dérivation. Les pôles engendrés par l'enroulement auxiliaire sont, pour $\cos\varphi = 1$, en avance sur ceux de l'inducteur de l'excitatrice. Si $\cos\varphi$ diminue, la force magnétomotrice produite par cet enroulement auxiliaire se rapproche en phase de celle de l'inducteur fixe. L'enroulement auxiliaire, pour un courant donné, renforce donc le champ d'autant plus que $\cos\varphi$ est plus petit.

Si la phase du courant induit était en avance sur celle de la tension, l'enroulement auxiliaire agirait sur le champ en sens inverse.

La figure 43 représente la partie tournante seule de cette

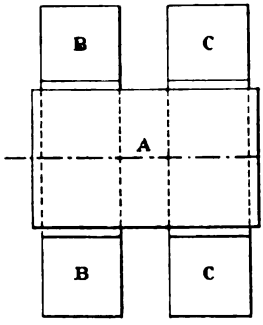
Digitized by Google

machine; l'induit de la génératrice, ainsi que l'inducteur de l'excitatrice ne sont pas indiqués.

L'Exposition universelle de Paris en 1900 comprenait une machine à courant triphasé de 600 kilowatts, 2400 volts, 93,75 tours par minute, 50 périodes par seconde, construite par M. Grammont, munie d'une excitatrice *compoundeuse* Hutin et Leblanc accouplée à l'arbre de la génératrice au moyen d'une paire de roues d'engrenage (1).

Cette excitatrice se compose (*fig.* 44) d'un induit ordi-

Fig. 44.



naire A de machine à courant continu tournant à l'intérieur de deux inducteurs B et C à courant triphasé identiques à ceux des moteurs d'induction.

L'enroulement de l'inducteur B est relié en dérivation aux bornes de la génératrice. L'enroulement de C est en série avec la ligne partant des bornes de la génératrice.

Ces deux inducteurs produisent deux systèmes de champs tournants indépendants qui agissent sur l'induit A, sur le collecteur duquel des balais viennent recueillir le courant d'excitation de la génératrice.

C'est à l'inducteur C qu'est dévolue la fonction d'engendrer le supplément d'excitation nécessaire pour maintenir constante la tension aux bornes de la génératrice. A cet effet les deux inducteurs B et C sont calés l'un par rapport à l'autre suivant un angle convenable.

(1) *L'Industrie électrique* du 25 juin 1900, pages 249 et suivantes.

Digitized by Google

Grâce à un dispositif ingénieux, MM. Hutin et Leblanc sont arrivés à recueillir au moyen de balais fixes le courant continu engendré dans l'induit A par les deux systèmes de champs tournants.

Soit n la fréquence du courant triphasé inducteur, et m le nombre d'ondes de chaque système de champs tournants dans B et C. Chaque onde magnétique dans ces inducteurs fera $\frac{n}{m}$ tours par seconde.

Si l'induit A est immobile, et si son collecteur est muni de $2m$ jeux de balais, ceux-ci, pour recueillir le courant continu, devront faire également $\frac{n}{m}$ tours par seconde.

Les m jeux de balais positifs étant reliés en quantité, ainsi que les m jeux de balais négatifs, on pourra donner au collecteur m fois moins de lames, et réduire à deux le nombre de jeux de balais. Ces balais devront alors faire m fois plus de tours par seconde que le champ.

Si nous adoptons $2k$ jeux de balais sur le collecteur de A, ceux-ci devront faire $\frac{m}{k}$ fois plus de tours par seconde que le champ.

Faisons tourner A dans le même sens que les champs inducteurs, et soit s son nombre de tours par seconde. La vitesse du champ par rapport à l'induit est

$$\frac{n}{m} - s. \tag{1}$$

Les balais doivent donc avoir une vitesse par rapport à l'induit

$$\frac{m}{k}\left(\frac{n}{m} - s\right) = \frac{n - ms}{k}. \tag{2}$$

Si nous renversons les connexions de l'enroulement de A comme l'indique la figure 45, en reliant les extrémités des bobines non pas, comme à l'ordinaire, suivant les traits pointillés, mais aux lames du collecteur symétriques par rapport à un axe XY (dans le cas où il y a $2k$ jeux de balais, il y

Digitized by Google

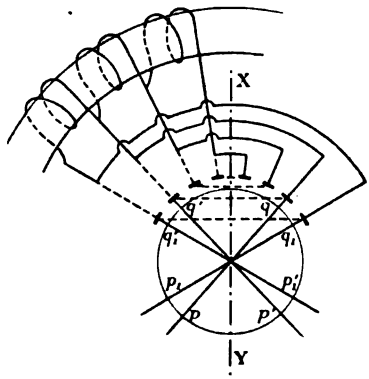
a k axes de symétrie), le sens de rotation des balais doit être renversé. La vitesse de ces balais par rapport à l'induit est donc $-\frac{n-ms}{k}$, et leur vitesse absolue dans l'espace

$$(3) \qquad s-\frac{n-ms}{k}=\frac{(k+m)s-n}{k}.$$

La condition de fixité des balais est donc

$$(4) \qquad m+k=\frac{n}{s}.$$

Fig. 45.



Si l'on fait tourner l'induit A en sens contraire du champ, la vitesse de ce champ par rapport à A est

$$(5) \qquad \frac{n}{m}+s,$$

et la vitesse des balais par rapport à A

$$(6) \qquad \frac{m}{k}\left(\frac{n}{m}+s\right)=\frac{n+ms}{k}.$$

La vitesse absolue des balais, dans le sens du champ, est

$$(7) \qquad \frac{n+ms}{k}-s=\frac{n-(k-m)s}{k}.$$

Digitized by Google

Dans ce cas, le dispositif de renversement des connexions est inutile, et la condition de fixité des balais est

$$k - m = \frac{n}{s}. \tag{8}$$

Dans le cas où l'induit A tourne dans le même sens que le champ, on a

$$\frac{n}{m} = \left(1 + \frac{k}{m}\right)s > s.$$

Le pignon de l'induit A entraîne donc la roue dentée calée sur l'arbre de la génératrice. La puissance restituée à cet arbre est à la puissance totale qui lui est demandée par l'excitatrice dans le rapport de s à $\frac{n}{m}$.

Pour l'excitatrice en question, on a adopté

$$m = 3, \qquad k = 6.$$

On a donc

$$s \times 60 = \frac{50}{9} \times 60 = 333 \text{ tours par minute.}$$

§ V. — Accouplement des génératrices.

L'accouplement en quantité des génératrices de courant polyphasé ou de courant alternatif exige certaines conditions dont les principales sont :

1° Que les génératrices tournent à la même vitesse;

2° Que les tensions aux bornes des machines soient égales;

3° Que ces tensions coïncident en phase;

4° Que le mouvement de rotation des machines, pendant chaque révolution, soit suffisamment uniforme;

5° Enfin, il doit exister certaines relations entre les génératrices et leurs moteurs.

1. L'ajustement des vitesses s'obtient en agissant sur les régulateurs des moteurs à vapeur ou des turbines, ou bien,

Digitized by Google

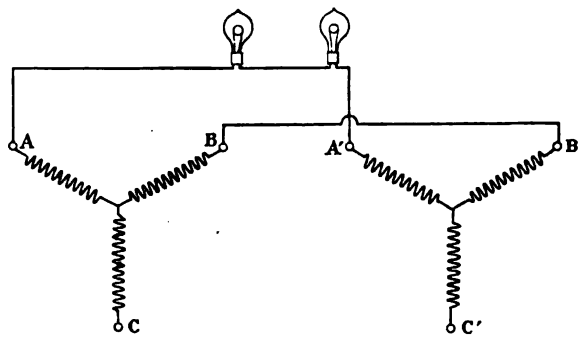
si celles-ci sont dépourvues de régulateur, sur leur vannage. Dans le cas où les génératrices sont différentes, leurs nombres de tours par minute doivent évidemment être en raison inverse de leurs nombres de pôles.

Les régulateurs de vitesse doivent donc être construits de façon à permettre de régler la vitesse entre certaines limites, en marche.

2. On ajuste alors les tensions en manœuvrant le rhéostat d'excitation de la génératrice que l'on veut mettre en service. Cette machine, ainsi que le groupe déjà en fonctionnement, sont munis chacun d'un voltmètre.

3. Les vitesses des deux groupes générateurs n'étant pas rigoureusement égales, les tensions aux bornes arrivent périodiquement à coïncider en phase. C'est l'un de ces instants que l'on doit choisir pour effectuer l'accouplement en quantité. On perçoit ces instants de coïncidence de phase à l'aide d'un dispositif très simple appelé *synchronoscope*, constitué généralement par deux lampes à incandescence en série, reliées à l'une des bornes de chaque groupe de machines, dont deux autres bornes sont connectées directement ensemble (*fig.* 46).

Fig. 46.



Au fur et à mesure que la différence entre les phases des deux tensions se rapproche d'une demi-période, les lampes éclairent de plus en plus, et leur éclat est maximum lorsque

Digitized by Google

cette différence de phase atteint une demi-période; puis leur éclat diminue, et elles s'éteignent lorsque les phases diffèrent d'une période, ou, ce qui revient au même, coïncident. C'est de cet instant qu'il faut profiter pour accoupler les machines.

Si les génératrices sont à haute tension, ce qui est le cas général, chacune est munie d'un petit transformateur dont le primaire est connecté aux bornes A, B, A′, B′ des génératrices et dont les bornes secondaires sont reliées aux lampes comme l'indique la figure 46. Ces petits transformateurs servent également aux voltmètres des machines. On peut encore alimenter le synchronoscope et le voltmètre en disposant à côté de l'une des bobines de l'armature de la génératrice, dans les mêmes cannelures, une petite bobine donnant par exemple 110 ou 120 volts.

Les deux lampes à incandescence peuvent être remplacées par un voltmètre capable de mesurer le double de la tension de chaque génératrice. La déviation de l'aiguille croît à mesure que la différence de phase des tensions se rapproche d'une demi-période, passe alors par un maximum, puis décroît et s'annule lorsque les phases coïncident.

4. Pour que la fréquence fût absolument constante, il faudrait que la vitesse angulaire de la machine fût elle-même invariable, c'est-à-dire que le moteur produisît un couple constant pendant une révolution. Pour cette raison, une turbine est préférable à une machine à vapeur à plusieurs cylindres, et celle-ci est supérieure à une machine à cylindre unique.

Des moteurs réglant bien leur nombre de tours par minute, ayant une vitesse angulaire moyenne par tour bien constante, peuvent donner des variations de vitesse instantanée importantes; nous verrons que de tels moteurs ne conviennent pas à l'accouplement des génératrices.

Considérons une génératrice donnant 50 périodes par seconde, actionnée directement par une machine à vapeur à un cylindre, faisant 100 tours par minute. La génératrice a donc 60 pôles. On impose, pour des raisons que nous examinerons plus loin, la condition que l'écart maximum de l'inducteur tournant par rapport à la position qu'il aurait si sa

Digitized by Google

rotation était rigoureusement uniforme soit 2 degrés ou $\frac{1}{90}$ du pas polaire, en avance ou en retard. On demande quel doit être le coefficient d'irrégularité de la machine à vapeur [1].

La machine à vapeur donne deux impulsions motrices par tour. Nous pouvons diviser une impulsion motrice, ou une demi-révolution, en quatre temps :

1° La vitesse augmentant, la génératrice atteint la vitesse moyenne, la dépasse et arrive à la position moyenne;

2° La vitesse continuant à croître, la machine prend une avance sur la position moyenne;

3° La vitesse diminuant, la machine perd successivement son avance et atteint la position moyenne;

4° La vitesse continuant à décroître, la machine prend du retard, qui devient maximum un peu après la fin du demi-tour ou l'origine d'une nouvelle impulsion motrice.

La loi de variation de la vitesse pendant la période d'une révolution dépend évidemment de l'admission de la vapeur, de sa détente, des masses en mouvement : piston, bielle, volant, inducteur de la génératrice; nous nous contenterons donc ici du raisonnement approché suivant :

Pendant un quart d'impulsion, soit pendant $\frac{1}{8}$ de tour, la génératrice éprouve un déplacement relatif de $\frac{1}{90}$ de pôle, ou $\frac{1}{5400}$ de la circonférence.

La génératrice fait un tour pendant

$$\frac{1}{\left(\frac{100}{60}\right)} = 0,6 \text{ seconde.}$$

---

[1] Nous désignons ici par coefficient d'irrégularité d'une machine à vapeur le quotient de la différence entre la vitesse instantanée maximum et la vitesse moyenne, ou entre la vitesse moyenne et la vitesse instantanée minimum, par la vitesse moyenne.

Le Comité de la Société internationale des Électriciens en 1900 a proposé la définition différente ci-dessous du coefficient d'irrégularité k d'une machine à vapeur :

$$k = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{moy}},$$

ω_{max}, ω_{min}, ω_{moy} désignant les vitesses angulaires instantanées maximum et minimum, et moyenne.

Digitized by Google

La durée de $\frac{1}{8}$ de tour est donc $\frac{0,6}{8}$ seconde.

En désignant par a la vitesse angulaire relative moyenne, on a donc

$$a \times \frac{0,6}{8} = \frac{2\pi}{5400}$$

ou

$$a = \frac{2\pi}{5400} \times \frac{8}{0,6}.$$

Si nous admettons que l'écart maximum de vitesse instantanée est le double de cette vitesse relative moyenne, nous aurons l'expression suivante pour le coefficient d'irrégularité

$$\frac{2 \times \frac{2\pi}{5400} \times \frac{8}{0,6}}{2\pi \frac{100}{60}} = \frac{1}{337,5}.$$

Le degré d'irrégularité suivant la définition du Comité de la Société internationale des Électriciens serait donc égal à $\frac{1}{169}$.

Si l'on considère un moteur à vapeur donné, les variations de la fréquence pendant une révolution sont d'autant plus importantes que la fréquence est plus élevée, c'est-à-dire que la génératrice a un plus grand nombre de pôles.

Considérons une génératrice donnant 25 périodes par seconde, actionnée directement par une machine à vapeur compound à deux manivelles à angle droit, donnant par conséquent quatre impulsions par révolution, et faisant 75 tours par minute. Admettons que la vitesse varie de telle sorte que, pendant une impulsion motrice, la génératrice prenne alternativement une avance maximum et un retard maximum de $\frac{1}{10}$ pour 100 sur la machine théorique qui tournerait à une vitesse constante et égale à la vitesse moyenne.

La génératrice ayant 40 pôles, cette avance ou ce retard correspondent à $\frac{1}{100}$ de pôle. Le développement d'un pôle représente une demi-période, ou 180°; un retard de $\frac{1}{100}$ de pôle correspond donc à 1°,8. Si, au même instant, une

Digitized by Google

seconde génératrice accouplée en parallèle avec la première se trouve en avance de la même quantité, les phases des forces électromotrices des deux machines différeront de 3°,6, et un courant d'échange égal au courant de court-circuit multiplié par $2 \sin \frac{3^\circ,6}{2}$, ou 6 pour 100 de ce courant, prendra naissance.

Si la génératrice donnait 60 périodes par seconde, à la même vitesse, elle aurait 96 pôles, et chaque impulsion correspondrait à 24 pôles. Dans ce cas, le déplacement relatif est 4°,3 et la différence de phase maximum des forces électromotrices de deux machines est 8°,6, donnant naissance à un courant d'échange entre les deux génératrices égal à 15 pour 100 du courant de court-circuit.

Pour un coefficient d'irrégularité donné, le courant d'échange est donc d'autant plus important que la fréquence est plus élevée et que le courant de court-circuit est plus grand.

Ce courant d'échange est indiqué par les battements des ampèremètres des génératrices. Il peut, dans certains cas, être assez considérable pour produire des variations nuisibles dans la tension aux barres du tableau.

Une grande régulation des génératrices peut donc être défavorable à leur accouplement; en général, la plus faible régulation compatible avec la nature de la charge assure le meilleur fonctionnement en quantité.

L'expérience a montré qu'un écart maximum de 2°,5 à 3°, c'est-à-dire une différence maximum de phase entre deux machines de 5° à 6°, correspond à peu près à la limite extrême d'une bonne pratique.

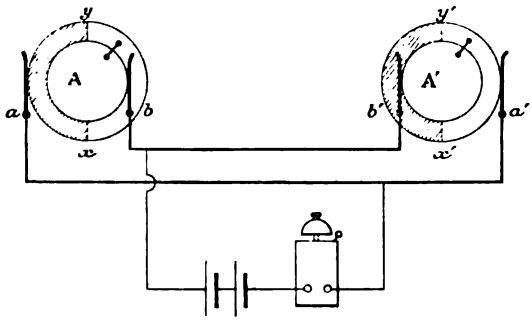
On a proposé, pour éviter que cette différence de phase, prenne naissance, d'accoupler les génératrices lorsque les manivelles des machines à vapeur sont parallèles.

Si les machines ne sont pas à grande vitesse, si elles font, par exemple, 100 tours par minute, on peut saisir directement l'instant du parallélisme. Dans le cas contraire, on peut adopter le dispositif de la figure 47. On monte sur l'arbre A de chaque génératrice un anneau dont la moitié est métallique et l'autre isolante. Les balais a, a' sont reliés à une

Digitized by Google

sonnerie actionnée par une pile dont le second pôle est connecté aux balais b, b' frottant constamment sur les arbres A, A'. Ces balais b, b' peuvent être supprimés en reliant les bâtis des machines au second pôle de la pile. Chaque diamètre xy est parallèle à l'une des manivelles de la machine correspondante. On voit aisément que la sonnerie ne fonctionne sans interruption que lorsque les diamètres xy, $x'y'$, et par suite aussi les manivelles, sont parallèles.

Fig. 47.



5. Le régulateur de vitesse de la machine à vapeur tend par sa nature à produire un mouvement pendulaire. Si la vitesse du moteur vient à tomber légèrement au-dessous de sa valeur normale, le régulateur ouvre et admet une plus grande quantité de vapeur, de façon à rétablir la vitesse normale. A ce moment, le cylindre a reçu une quantité de vapeur plus grande que celle nécessaire, et le moteur continue à s'accélérer jusqu'à ce que le régulateur commence à fermer, jusqu'à ce que la vitesse normale soit de nouveau rétablie; l'action du régulateur dans ce sens est encore exagérée, et il recommence à augmenter l'admission, et ainsi de suite. Plus le volant est puissant, plus le moteur met de temps à recouvrer sa vitesse de régime.

Si la machine fonctionne seule, le régulateur arrive généralement vite au repos. Si deux groupes générateurs sont accouplés en quantité, les régulateurs des deux machines tendent à s'influencer mutuellement et à prendre un mouvement pendulaire qu'ils transmettent aux moteurs. On réduit

Digitized by Google

cet effet en munissant les régulateurs de freins à l'huile.

La vitesse pendant une révolution doit être aussi constante que possible, mais une régulation parfaite entre la charge nulle et la pleine charge n'est pas nécessaire, et peut même être défavorable, dans le cas de grosses unités. Il est même préférable que la vitesse entre la charge nulle et la pleine charge baisse de plusieurs pour 100, afin d'assurer une bonne répartition de la charge entre les machines en parallèle.

On peut encore munir l'une des machines accouplées en quantité d'un régulateur sensible, les autres machines étant pourvues de régulateurs moins sensibles que l'on ajuste à la main dès que la charge de l'usine a subi une variation suffisante. Dans quelques installations, un dispositif permet d'agir sur les régulateurs depuis le tableau.

Il arrive parfois que des machines accouplées en quantité fonctionnent tout d'abord régulièrement, puis prennent un mouvement pendulaire. Ce phénomène se produit même lorsque la machine à vapeur a une grande régularité, le coefficient d'irrégularité étant compris, par exemple, entre $\frac{1}{100}$ et $\frac{1}{300}$. En outre ce mouvement perpendiculaire ne se développe parfois que très lentement. Ces deux observations ont conduit M. Kapp [1] à considérer ce phénomène comme dû à une sorte de résonance produite par l'action mutuelle des impulsions motrices, des masses en mouvement et de la self-induction des génératrices.

M. Kapp montre que, dans certains cas, un accroissement du moment d'inertie du volant peut non seulement ne pas atténuer ce trouble dans le fonctionnement, mais même l'accentuer. Il trouve qu'il doit exister un certain rapport entre le moment d'inertie des masses en mouvement et la self-induction de la génératrice. Si des groupes générateurs établis manifestent un mouvement pendulaire, on peut les corriger en modifiant soit le moment d'inertie des masses en mouvement, soit la self-induction des génératrices, soit encore ces deux facteurs simultanément.

---

(1) *Elektrotechnische Zeitschrift*, 16 février 1899.

Digitized by Google

En particulier, un moyen très simple consiste à adjoindre une ou plusieurs bobines de self-induction à l'armature de la génératrice.

Lorsque des génératrices accouplées ont un mouvement pendulaire, le courant moyen d'armature subit des variations périodiques. La réaction du courant d'armature sur le champ varie donc aussi périodiquement; il en résulte que le champ dans l'entrefer oscille par rapport aux pôles inducteurs. On a employé plusieurs procédés pour amortir ces oscillations périodiques du champ et atténuer par suite le mouvement pendulaire.

Le procédé le plus simple consiste à employer des pôles inducteurs massifs, et non laminés. Les oscillations du champ développent alors dans ces pôles des courants de Foucault qui tendent à amortir ces oscillations.

MM. Hutin et Leblanc pratiquent dans les pièces polaires, parallèlement à l'axe de la machine, des trous très voisins de la surface polaire, dans lesquels ils logent des tiges de cuivre dont les extrémités sont reliées sur chaque joue au moyen d'une barre de cuivre méplate. Ces barres méplates peuvent même faire le tour de la machine de façon à relier ensemble toutes les tiges de cuivre longitudinales, l'amortisseur étant ainsi constitué par une grande cage d'écureuil analogue à celle des induits de certains moteurs d'induction.

On peut entourer chaque pièce polaire d'un anneau de cuivre qui vient se rabattre sur la surface intérieure des cornes polaires.

Enfin, le meilleur procédé consiste à fixer entre les cornes des pôles consécutifs des ponts de cuivre. Ces ponts sont formés d'une plaque de cuivre épaisse qui doit recouvrir la partie extrême des surfaces intérieures des cornes polaires. Dans les grandes machines, ces plaques de cuivre peuvent être évidées.

Les trois derniers procédés sont évidemment coûteux. Ils exigent un certain espace dont on ne dispose pas toujours dans le cas où l'inducteur tourne, et en outre la force centrifuge à laquelle ces pièces sont soumises doit entrer en ligne de compte dans les calculs de résistance de l'inducteur.

Digitized by Google

§ VI. — Description de machines a courant polyphasé.

La machine Gramme à courant alternatif, pour bougies Jablochkoff, est un premier exemple de génératrice de courant polyphasé, quoique le but visé par l'inventeur n'ait pas été la production de courants polyphasés et de champs tournants. L'inducteur de cette machine est une étoile de fer dont les branches portent les bobines inductrices engendrant une série de pôles alternativement nord et sud. Il tourne à l'intérieur d'un anneau de fil de fer autour duquel sont enroulées les bobines induites.

L'une de ces machines peut alimenter quatre séries de cinq bougies Jablochkoff, à la vitesse de 1220 tours par minute. L'inducteur à six pôles reçoit le courant d'une excitatrice dont l'arbre et le bâti sont communs aux deux machines. L'anneau induit est divisé en six segments correspondant chacun à un pôle inducteur. Chaque segment porte quatre bobines consécutives égales, 1, 2, 3, 4. Les bobines 1 des six segments sont reliées en série de manière que leurs forces électromotrices s'ajoutent. Il en est de même des bobines 2, 3 et 4. On obtient de la sorte entre les quatre paires de bornes de la machine quatre tensions alternatives différant entre elles d'un huitième de période.

La fin d'une bobine d'un segment étant reliée à la fin de la bobine correspondante du segment suivant, si on lance le courant de cette machine dans l'induit d'une machine identique, chaque circuit de la génératrice étant connecté au circuit correspondant de la seconde machine, celle-ci se trouvera absolument dans les mêmes conditions que si chaque série de huit bobines consécutives était alimentée respectivement par huit courants alternatifs présentant deux à deux une différence de phase d'un huitième de période. Les courants de la génératrice produiront donc dans la seconde machine un champ tournant; cette seconde machine est par conséquent un moteur synchrone.

Le but de cette disposition n'était pas de produire un courant polyphasé, mais de desservir plusieurs circuits distincts.

Digitized by Google

La puissance de la machine ainsi construite est très notablement supérieure à celle qu'elle produirait si l'induit portait une seule bobine par segment égale aux quatre bobines adoptées. L'utilisation spécifique de la machine est bien meilleure, et le rendement supérieur.

Montons deux machines à courant alternatif identiques, de façon que leurs arbres soient en prolongement l'un de l'autre, et que l'une des machines soit décalée d'un quart de période par rapport à l'autre : l'ensemble de ces deux machines constituera une génératrice de courant diphasé.

Ce dispositif est compliqué et coûteux. On lui a attribué comme avantage sérieux la facilité avec laquelle on peut régler la tension de chacune des deux sections diphasées, soit à l'origine, soit en un point quelconque de la ligne. Ce réglage s'obtiendrait, comme dans le cas de deux machines à courant alternatif montées en parallèle, à l'aide de deux rhéostats à main ou automatiques, agissant indépendamment sur les courants excitateurs des deux inducteurs dont les enroulements sont montés en quantité sur une excitatrice à courant continu. On peut donc, de la sorte, compenser aisément les inégalités de tension qui résulteraient de charges différentes sur les deux sections de la ligne. Ces inégalités sont dues aux réactions d'induit et à la résistance de la ligne.

Ce réglage peut être parfait au point de vue de la lumière. Pour qu'il en soit de même au point de vue des moteurs, dans une distribution mixte, il faut que les deux machines à courant alternatif accouplées ne possèdent qu'une faible réaction d'induit; dans le cas contraire, des charges notablement différentes sur les deux sections de la ligne pourraient altérer dans une proportion nuisible la différence de phase égale à un quart de période entre les tensions produites par les deux machines chargées identiquement.

On peut simplifier la machine et la rendre plus compacte, tout en conservant la facilité du réglage distinct des deux sections, en montant les deux induits sur le même bâti et en calant les deux inducteurs sur le même arbre, ou inversement. En manchonnant une excitatrice avec l'arbre d'une telle machine, on obtiendrait un générateur complet de

Digitized by Google

courant diphasé, dont le réglage s'obtiendrait comme nous venons de l'indiquer.

L'Exposition de Chicago, en 1893, renfermait des machines à courant diphasé de 750 kilowatts, construites d'après ce principe par la Westinghouse Electric and Manufacturing Company.

Chacune de ces génératrices est constituée par deux machines à courant alternatif du type ordinaire de cette Société, à inducteur extérieur fixe et à induit intérieur mobile. Un socle commun porte les deux inducteurs formés chacun d'une culasse de fonte dans laquelle sont encastrées, au moule, 36 projections polaires en tôle d'acier portant les bobines inductrices.

Chaque induit est formé d'un noyau de tôle de $2^m,300$ de diamètre extérieur, muni de 36 dents en queue d'aronde. L'enroulement, en tambour, se compose de 36 bobines logées dans les 36 cannelures du noyau.

Les deux induits d'une machine sont calés sur le même arbre; les bobines de l'un des induits sont décalées d'un quart de période, ou de $\frac{1}{72}$ de circonférence par rapport aux bobines du second induit.

La machine fait 200 tours par minute; la fréquence est donc 60 périodes par seconde.

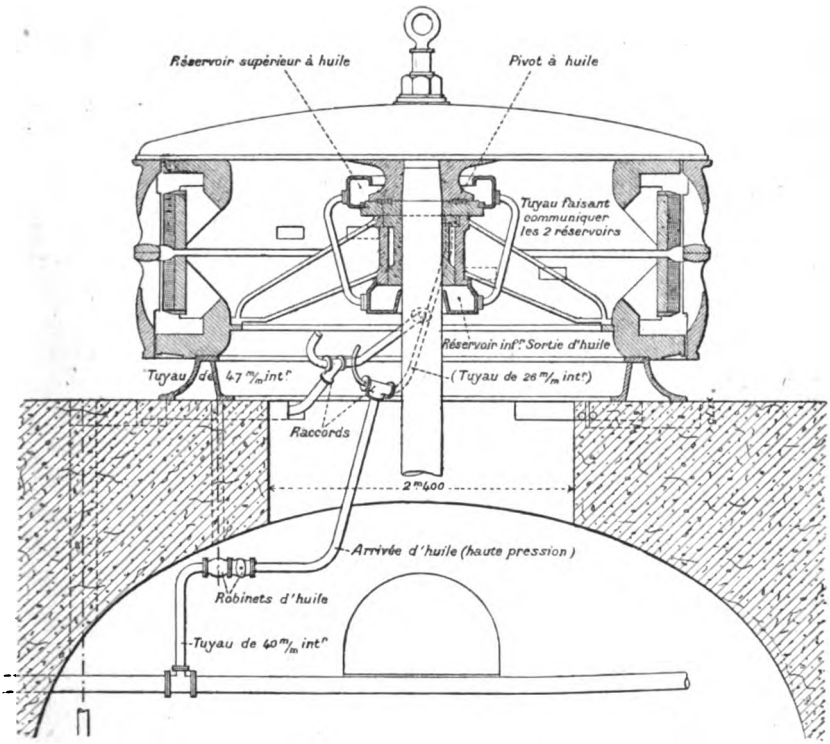
Chaque induit produit 185 ampères sous 2000 volts, soit 375 kilowatts, et est compoundé de la façon suivante : Un transformateur logé à l'intérieur de chaque induit a son primaire en série avec l'enroulement induit; le secondaire est connecté à un commutateur redresseur calé sur l'arbre de la machine. Deux balais recueillent ce courant redressé, de tension peu élevée, et l'envoient à un enroulement spécial disposé sur les projections polaires à côté de l'enroulement alimenté par le courant de l'excitatrice. Cette excitation additionnelle, de basse tension, est proportionnelle au courant principal de la machine. Chaque génératrice a donc deux transformateurs et deux commutateurs redresseurs.

Ce compoundage ne permet pas d'assurer une constance absolue de la tension, même à vitesse invariable, surtout si la machine actionne des récepteurs produisant un retard de

Digitized by Google

phase par rapport à la tension; mais il peut réduire dans une certaine mesure les écarts de tension qui, sans ce dispositif, seraient produits par la charge ou la décharge subite de la machine.

Fig. 48.



Les machines Thury de l'usine de Chèvres (Genève), de 1200HP, à 80 tours par minute, 45 périodes par seconde, engendrent deux courants alternatifs de 150 ampères à 2750 volts différant en phase d'un quart de période. Elles sont formées de deux machines unipolaires à courant alternatif simple, superposées, ayant chacune son induit et sa bobine excitatrice distincte (*fig.* 48). Chaque moitié est formée d'un bâti annulaire horizontal d'acier coulé sur lequel est fixé le

Digitized by Google

noyau de tôle lisse. La bobine excitatrice formée d'un ruban de cuivre est logée dans une rainure circulaire de cette carcasse magnétique.

La partie mobile représente une sorte de cloche de $4^{m},500$ de diamètre formée par un plateau de fonte calé sur l'extrémité supérieure de l'arbre vertical de la turbine, et supportant une pièce d'acier coulé cylindrique. Celle-ci, en deux parties, porte deux couronnes de 34 dents établissant le court-circuit magnétique, à l'entrefer près, entre les deux couronnes du bâti.

Les 34 bobines induites plates sont fixées au moyen de frettes sur les noyaux de tôle lisses.

Les enroulements des deux induits d'une génératrice sont décalés entre eux d'un quart de la distance entre les axes de deux pôles consécutifs. En faisant tourner l'un des induits par rapport à l'autre de façon à annuler ce décalage, chaque machine pourrait être transformée en génératrice de courant alternatif simple formée de deux machines à courant alternatif accouplées mécaniquement en quantité ou en série.

Chaque génératrice est prévue pour absorber une puissance de 800 à 1200 chevaux, suivant la chute variable obtenue au moyen d'un barrage établi sur le Rhône. La fréquence adoptée est 45 périodes par seconde.

Remarque. — En enroulant les deux induits des machines que que nous venons de décrire de manière à leur faire produire deux forces électromotrices dans le rapport 1 : 0,867, et en montant ces deux enroulements suivant le système Scott, que nous étudierons plus loin, on transformerait ces machines en génératrices de courant triphasé.

Une légère modification dans la construction permet de transformer aisément une machine à courant alternatif simple en une génératrice de courant diphasé.

Considérons, par exemple, une machine Siemens type W, à armature en disque, dont les bobines induites peuvent être groupées en deux séries situées de part et d'autre d'un diamètre, et desservant deux circuits extérieurs distincts, ou reliées en quantité.

Digitized by Google

Supprimons deux bobines diamétralement opposées; montons en tension ou en quantité toutes les bobines situées d'un même côté de ce diamètre, et déplaçons toutes celles de droite, par exemple, d'un angle égal à la moitié de l'angle formé par les axes de deux bobines consécutives. Nous obtiendrons de la sorte deux enroulements engendrant deux forces électromotrices alternatives égales dont les phases diffèrent d'un quart de période.

La machine Mordey, à induit en disque et à inducteur à bobine unique, se prête également bien à cette transformation.

Ce procédé a l'inconvénient de réduire la puissance de la machine en supprimant une partie de l'enroulement induit.

On a reconnu qu'en employant des machines à courant polyphasé bien établies, le réglage distinct des sections polyphasées n'a pas l'importance que quelques personnes lui avaient attribuée tout d'abord; que ce réglage entraînait au contraire une complication dans les machines et leurs appareils régulateurs, un coût plus élevé du matériel générateur et une diminution du rendement. On a alors construit uniquement des machines à courant polyphasé spéciales.

On peut adopter pour les machines à courant polyphasé modernes différentes classifications, suivant que l'on envisage l'organe fixe et l'organe mobile, ou bien que l'on considère le mode de construction de chaque organe, induit et inducteur.

D'après la première manière d'envisager les choses, les génératrices de courant polyphasé pourraient être réparties dans trois classes :

1° Génératrices à inducteur fixe et à induit mobile;

2° Génératrices à induit fixe et à inducteur mobile;

3° Génératrices à induit fixe, à enroulement inducteur fixe et à fer tournant. Le seul organe mobile est une pièce, ordinairement d'acier coulé, munie de projections polaires. Celles-ci, tournant en regard du noyau induit, reçoivent toutes la même polarité de la bobine inductrice fixe, d'où le nom de machines *unipolaires*.

Une deuxième classification, reposant sur des caractères

Digitized by Google

plus essentiels, a pour base le mode de construction de l'induit et de l'inducteur.

La plupart des induits peuvent s'adapter à l'un quelconque des types d'inducteurs.

Nous répartirons les induits dans trois classes :

Première classe. *Induits à enroulement continu, fermé, en anneau ou en tambour.* — Ils sont identiques aux induits de machines à courant continu, et sont généralement mobiles.

Deuxième classe. *Induits à pôles.* — Ce type dérive de la machine Lontin à courant alternatif. Le noyau porte des projections polaires sur lesquelles sont fixées les bobines induites. Dans une génératrice à courant triphasé avec inducteur à pôles alternés, l'induit a trois projections polaires par paire de pôles inducteurs; les axes de deux bobines induites consécutives sont donc à une distance angulaire égale au tiers de la distance angulaire de deux pôles consécutifs de même nom. Les bobines sont disposées côte à côte, ne se chevauchent pas. Ces induits sont tantôt fixes, tantôt mobiles.

Troisième classe. *Induits à enroulement enchaîné.* — La distance angulaire moyenne des brins consécutifs d'une même section polyphasée est égale à la distance angulaire des axes de deux pôles inducteurs consécutifs de noms contraires. L'enroulement, ordinairement en tambour, est logé en général dans des cannelures du noyau induit. Chaque bobine induite est chevauchée par la bobine précédente et par la suivante. Ces induits sont tantôt fixes, tantôt mobiles.

Les inducteurs peuvent être répartis dans trois classes :

Première classe. *Inducteurs à pôles alternés, munis chacun d'une bobine excitatrice.* — Ces inducteurs sont tantôt fixes, tantôt mobiles. Lorsqu'ils sont mobiles à l'intérieur de l'induit, ils affectent la forme d'une étoile.

Deuxième classe. *Inducteurs à pôles alternés à bobine excitatrice unique.* — Ces inducteurs sont généralement mobiles à l'intérieur de l'induit; la bobine excitatrice tourne avec le noyau et les projections polaires de l'inducteur.

Digitized by Google

Troisième classe. *Inducteurs unipolaires.* — Dans un inducteur ordinaire à pôles alternés, supprimons tous les pôles de rang pair, par exemple; tous les pôles de rang impair conservés auront même polarité, soit nord. Il sera donc possible de les exciter par une seule bobine disposée latéralement au fer inducteur, dans un plan normal à l'axe de la machine, et donnant au noyau de l'induit une polarité sud. Les flux émis par les projections polaires de l'inducteur traverseront l'entrefer et le noyau induit, et leur retour à la couronne des pôles devra être assuré à travers le bâti de la machine.

Dans ces génératrices, l'induit est fixe, ainsi que la bobine excitatrice. Le seul organe mobile est la pièce, généralement d'acier coulé, portant les projections polaires. La prise du courant induit et l'amenée du courant excitateur s'effectuent au moyen de bornes fixes. La machine ne possède donc ni bagues, ni balais.

Les machines unipolaires sont à induit unique ou à deux induits. Dans ce dernier cas, la pièce tournante a deux couronnes de pôles, l'une nord, l'autre sud.

Enfin nous dirons quelques mots des génératrices asynchrones, qui ne sont autres que des moteurs d'induction.

I. — *Induits à enroulement continu.*

Les induits de la première classe, à enroulement continu, fermé, appartiennent aux génératrices de courant polyphasé du type Bradley. Ces machines ne diffèrent essentiellement des dynamos à courant continu que par l'adjonction de bagues métalliques reliées respectivement à autant de points de l'enroulement induit mobile dont les positions relatives correspondent à des différences de phase déterminées. Des balais frottant sur ces bagues recueillent le courant polyphasé.

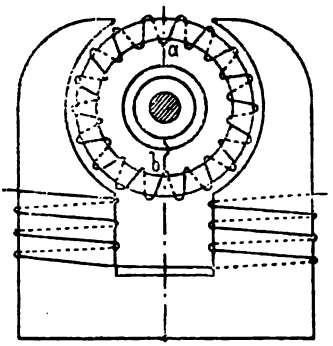
Considérons une machine à courant continu à deux pôles, à anneau Gramme par exemple (*fig.* 49), et relions deux points *a* et *b* de l'enroulement induit, diamétralement opposés, à deux bagues isolées, calées sur l'arbre de la

Digitized by Google

dynamo. Si cette machine étant excitée fait N tours par minute, nous obtiendrons sur les deux bagues une tension alternative de fréquence $n = \frac{N}{60}$.

Si les dimensions et la forme des pièces polaires sont telles que le champ magnétique puisse être considéré comme

Fig. 49.



réparti sinusoïdalement dans l'entrefer, la force électromotrice engendrée dans l'induit sera sinusoïdale.

En désignant par E_c la force électromotrice produite par la machine à courant continu, la force électromotrice alternative efficace sera

$$(1) \qquad E = \frac{E_c}{\sqrt{2}} = 0,707 E_c,$$

inférieure d'environ 30 pour 100 à la tension du courant continu.

Pour une même perte en watts dans l'enroulement induit le courant efficace intérieur sera égal au courant continu $\frac{I}{2}$ dans chaque moitié de l'enroulement. La puissance de la machine utilisée comme génératrice de courant alternatif est donc

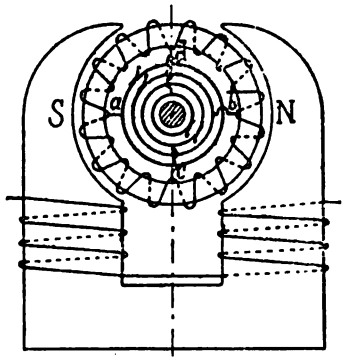
$$(2) \qquad EI = 0,707 E_c I$$

Digitized by Google

inférieure d'environ 30 pour 100 à la puissance de la dynamo à courant continu.

Calons sur l'arbre de la machine une seconde paire de bagues, et relions-les aux deux points *c* et *d* de l'enroulement induit situés à 90° des points *a* et *b* (*fig.* 50). Nous obtien-

Fig. 50.



drons encore sur ces deux bagues une tension alternative ayant même fréquence *n* et même moyenne efficace E que celle entre les bagues *a* et *b*, mais dont la phase diffère d'un quart de période par rapport à la première. La machine sera donc une génératrice de courant diphasé.

Remarque. — Les quatre sections *ca*, *bc*, *db*, *ad* engendrent quatre forces électromotrices dont les phases diffèrent d'un quart de période. En montant des récepteurs entre les paires de bagues reliées aux points *ac*, *cb*, *bd*, *da*, nous obtiendrons donc quatre courants différant en phase deux à deux d'un quart de période. Une telle machine peut donc être envisagée à volonté comme génératrice de courant diphasé ou de courant tétraphasé.

Fermons les deux paires de balais *ab*, *cd*, respectivement sur deux résistances égales, et appelons J la moyenne efficace de chacun des deux courants (*fig.* 51). Ceux-ci auront pour expression, à l'instant *t*, en prenant pour origine des

Digitized by Google

temps l'instant où le courant i_1 est nul,

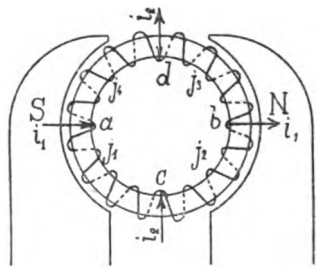
$$(3) \qquad i_1 = J\sqrt{2}\sin 2\pi nt,$$

$$(4) \qquad i_2 = -J\sqrt{2}\cos 2\pi nt.$$

Remarquons que l'instant pris pour origine est celui où le diamètre *ab* coïncide avec l'axe du champ, car dans cette position la tension entre les points *a* et *b* et nulle.

Soient j_1, j_2, j_3, j_4 les courants qui parcourent à l'instant *t* les quatre quadrants *ac*, *cb*, *bd* et *da*, comptés positivement

Fig. 51.



quand ils sont dirigés dans le sens *acbda* par exemple, et négativement dans le sens contraire. On a évidemment

$$(5) \qquad j_1 - j_4 = j_2 - j_3 = J\sqrt{2}\sin 2\pi nt,$$

$$(6) \qquad j_2 - j_1 = j_3 - j_4 = -J\sqrt{2}\cos 2\pi nt.$$

En remarquant que l'on a par raison de symétrie

$$j_3 = -j_1,$$
$$j_4 = -j_2,$$

on déduit des relations (5) et (6)

$$(7) \quad j_1 = \frac{J\sqrt{2}}{2}(\sin 2\pi nt - \cos 2\pi nt) = J\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{4}\right),$$

$$(8) \quad j_2 = \frac{J\sqrt{2}}{2}(\sin 2\pi nt + \cos 2\pi nt) = J\sin\left(2\pi nt + \frac{\pi}{4}\right).$$

Digitized by Google

Le courant efficace dans l'enroulement induit est donc

$$\frac{J}{\sqrt{2}} = 0,707 J. \tag{9}$$

En appelant I le courant continu que fournirait normalement la dynamo, le courant circulant dans l'enroulement serait égal à $\frac{I}{2}$; si donc on veut que les pertes en watts dans les fils de l'armature et, par suite, les échauffements produits soient les mêmes dans le cas du courant continu et du courant diphasé, on devra avoir

$$\frac{J}{\sqrt{2}} = \frac{I}{2}$$

ou

$$J = \frac{I}{\sqrt{2}} = 0,707 I. \tag{10}$$

Une dynamo capable de fournir un courant continu de tension E_c et d'intensité I peut donc produire deux courants alternatifs dont les phases diffèrent d'un quart de période, de tension $E = 0,707\ E_c$ et d'intensité $J = 0,707\ I$.

Si la machine travaille sur deux circuits égaux ne décalant pas le courant, tels que des résistances simples, la puissance est la même dans les deux cas, car on a

$$2EJ = E_c I. \tag{11}$$

L'excitation, si elle est prise sur le collecteur ordinaire de la dynamo, est faite sous la tension $E_c = 1,414\ E$.

Lorsque la machine débite, la réaction d'induit déplace l'axe du champ dans le sens de la rotation.

Les relations (7) et (8) montrent que le courant dans un quadrant est maximum, en valeur absolue, lorsque l'axe du quadrant considéré coïncide avec l'axe du champ; ce courant maximum est égal à la moyenne efficace de chacun des deux courants composant le courant diphasé.

Relions maintenant trois points *a, b, c* de l'enroulement induit distants de 120° à trois bagues isolées calées sur l'arbre de l'armature (*fig.* 52).

Digitized by Google

Soit z le nombre de spires sur chaque moitié de l'armature, et ε la force électromotrice maximum engendrée par une spire. En désignant par α l'angle que fait une spire quelconque d'une section ab par exemple avec l'axe de cette section, on a

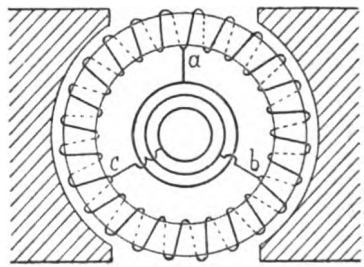
$$(12) \qquad E_c = 2\int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} \varepsilon \cos\alpha \frac{z}{\pi} d\alpha = \frac{2}{\pi}\varepsilon z$$

et la tension efficace entre deux bagues est

$$(13) \quad E = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{3}} \varepsilon \cos\alpha \frac{z}{\pi} d\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} E_c = 0,61 E_c.$$

Pour une même perte en watts dans l'enroulement induit

Fig. 52.



que dans le cas du courant continu, le courant efficace intérieur est évidemment égal à $\frac{I}{2}$; le courant à un balai sera donc

$$(14) \qquad J = \frac{I}{2}\sqrt{3} = 0,866 I.$$

La puissance de la machine est par conséquent

$$(15) \qquad 3E\frac{I}{2} = EJ\sqrt{3} = 3\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} E_c \frac{I}{2} = 0,9186 E_c I.$$

La puissance de la machine utilisée comme génératrice de courant triphasé est donc inférieure d'environ 8 pour 100 à la puissance de la dynamo à courant continu.

Digitized by Google

Ce dispositif a encore l'inconvénient de donner lieu à des réactions d'induit asymétriques qui déforment continuellement le champ inducteur. Si l'on conservait le collecteur il y aurait par suite tendance à la production d'étincelles aux balais de cet organe.

Si l'excitation était prise sur le collecteur, elle aurait lieu sous la tension $E_c = 1,632\ E$.

Les machines de cette classe peuvent donc être auto-excitatrices. Cependant la tendance à la production d'étincelles au collecteur, due aux déformations périodiques du champ, ainsi que les difficultés d'une excitation sous un grand nombre de volts, lorsque la machine est à haute tension, ont fait adopter en général une excitation séparée.

M. Friese a effectué, à l'École supérieure de Darmstadt, une série de mesures de forces électromotrices sur trois dynamos à courant continu, à induit en anneau, munies de bagues collectrices de courant polyphasé. M. Friese a consigné les résultats de ses recherches dans un Tableau que nous reproduisons ci-dessous (1) :

NOMBRE de phases.	FORCE électromotrice mesurée, en volts.			FORCE électromotrice calculée, en volts.	RAPPORT K de la force électr. calculée à la force électr. du courant continu.	PUISSANCE en pour 100 de la puissance	
	Machine I à 6 pôles.	Machine II à 6 pôles.	Machine III à 2 pôles.			de la dynamo à courant continu.	de la dynamo à nombre de phases infini.
1	2	3	4	5	6	7	8
Courant continu...	100,0	100,0	100,0	100,0	1,000	100,0	90,0
Courant alternatif.	71,0	71,8	»	70,7	0,707	70,7	63,7
$n = 2$.....	71,0	71,8	»	70,7	0,707	100,0	90,0
$n = 3$.....	61,3	62,0	61,8	61,2	0,612	91,8	82,7
$n = 4$.....	49,8	50,7	»	50,0	0,500	100,0	90,0
$n = 6$.....	35,0	35,8	»	35,4	0,354	106,2	95,7
$n = 12$.....	18,0	18,6	»	18,3	0,183	109,8	98,9
$n = \infty$.....	»	»	»	»	»	111,0	100,0

(1) *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1894.

Digitized by Google

L'excitation de ces machines était réglée de manière à maintenir une tension de 100 volts aux balais du collecteur de courant continu.

La première colonne indique le nombre de phases pour lequel les machines étaient montées dans chaque expérience. Les colonnes 2, 3, 4 renferment les forces électromotrices efficaces mesurées aux bornes de chaque section.

Les nombres des colonnes 5 et 6 sont les résultats donnés par le calcul en supposant que la force électromotrice engendrée par une spire induite est sinusoïdale.

Nous avons complété le Tableau de M. Friese par l'adjonction de deux colonnes. La colonne 7 indique la puissance calculée des machines pour les différents nombres de phases, pour une même perte en watts dans l'enroulement induit, exprimée en pour 100 de la puissance du courant continu. La colonne 8 donne la puissance des machines calculée en pour 100 de la puissance pour un nombre infini de phases.

D'après ce Tableau, les valeurs mesurées pour les trois machines expérimentées concordent d'une manière presque parfaite avec les résultats du calcul.

En comparant les relations (11) et (15), on voit qu'*avec ce mode de montage* il y a avantage, au point de vue du rendement spécifique, à faire produire à une dynamo du courant diphasé plutôt que du courant triphasé.

Nous avons pris comme exemple une machine à deux pôles. En général, pour obtenir la fréquence voulue avec un nombre de tours par minute qui ne soit pas trop élevé, et pour ne pas avoir des machines puissantes d'une longueur exagérée dans le sens de l'axe, on donne à l'inducteur 4, 6, 8, ..., $2p$ pôles. Chaque bague collectrice est alors connectée à 2, 3, ..., p points de l'enroulement continu.

La figure 53 est le schéma d'une machine à courant diphasé à quatre pôles.

La première machine industrielle de ce type a été produite par la maison Schuckert, de Nurenberg, à l'Exposition d'Électricité de Francfort, en 1891. C'est la dynamo Schuckert classique, dont l'induit est un anneau Gramme plat, et dont l'inducteur est formé de deux couronnes de pôles parallèles

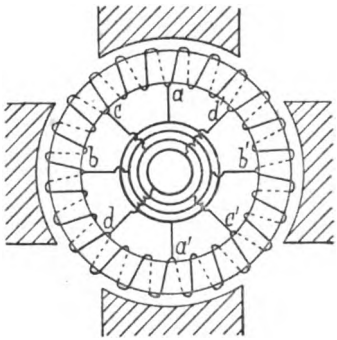
Digitized by Google

à l'axe, situées de part et d'autre de l'armature. Un collecteur à quatre bagues, calé sur l'arbre, est connecté à l'enroulement induit comme nous l'avons expliqué plus haut.

L'usine génératrice de Budapest, installée par la maison Schuckert, comprend des machines à courant diphasé de 66 kilowatts et de 300 à 335 kilowatts. La fréquence adoptée est 26 périodes par seconde.

Les machines de 66 kilowatts ont comme induit un anneau Gramme ordinaire, à enroulement fermé. L'inducteur, à huit pôles, est identique à celui des dynamos multipolaires. Il est constitué par une culasse polygonale d'acier portant huit

Fig. 53.



projections intérieures, munies de pièces polaires également d'acier. La machine fait 400 tours par minute; elle produit deux courants alternatifs de 18,5 ampères sous une tension de 1800 volts. Chaque machine porte, calée à l'extrémité de son arbre, une excitatrice de 2,4 kilowatts à 220 volts.

Les grandes machines ont une puissance de 300 à 335 kilowatts; la tension aux bornes est de 1800 à 1900 volts; elles font 112 tours par minute. Leur construction est analogue à celle des génératrices de 66 kilowatts.

L'inducteur se compose d'une couronne d'acier coulé, à section en U, munie de 28 projections polaires intérieures portant l'enroulement excitateur. Les deux paliers de la machine forment le centre d'étoiles à trois branches dont les extrémités sont boulonnées sur les joues de la culasse en U.

Digitized by Google

Chaque génératrice est accouplée directement, au moyen d'un manchon boulonné, avec une machine à vapeur verticale à triple expansion faisant 112 tours par minute. L'autre extrémité de l'arbre du moteur actionne, par l'intermédiaire d'une paire de roues dentées, une excitatrice de 10 kilowatts faisant 450 tours par minute.

Le collecteur de l'une de ces grandes machines est monté entre l'armature et le palier extrême; il est formé d'un plateau d'ébonite sur lequel les quatre bagues sont fixées concentriquement, dans le même plan.

Les induits à enroulement continu correspondent au montage polygonal ou fermé. Ils ne diffèrent donc pas essentiellement des autres types d'induits si ce n'est par la propriété remarquable qu'ils possèdent de permettre l'adjonction d'un collecteur de courant continu.

Ce type d'enroulement induit se retrouve encore dans les machines à double courant.

Machines à double courant. — Ces machines sont destinées à fournir l'énergie simultanément sous forme de courant continu et de courant polyphasé. Ce sont des dynamos à courant continu portant, en outre de leur commutateur ordinaire, un collecteur à bagues pour courant polyphasé.

Une génératrice à double courant doit évidemment remplir simultanément les conditions exigées par une dynamo à courant continu et par une machine à courant polyphasé. Ses dimensions, sa vitesse et son nombre de pôles doivent satisfaire aux conditions de bon fonctionnement simultanément d'une machine à courant continu et d'une génératrice de courant polyphasé. Ainsi dans la plupart des cas il n'est pas pratique de les construire pour une fréquence supérieure à 25 périodes par seconde.

Ces machines exigent en général l'adjonction de transformateurs élevant la tension.

Les génératrices à double courant peuvent trouver leur utilisation rationnelle dans certaines installations ayant à distribuer la majeure partie de leur puissance sous forme de courant continu dans le voisinage, le supplément devant être

Digitized by Google

transporté à grande distance, et distribué sous forme soit de courant continu, soit de courant polyphasé.

L'usine génératrice des tramways de Lewiston, Brunswick et Bath comprend quatre machines à double courant, actionnées par des turbines. Chacune peut fournir une puissance de 250 kilowatts totalement sous forme de courant continu, ou totalement sous forme de courant triphasé.

La tension aux balais du collecteur à courant continu varie de 500 volts à charge nulle, à 550 volts à pleine charge. Le courant triphasé a une tension de 300 à 330 volts et une fréquence de 60 périodes par seconde. Ces génératrices ont 12 pôles et font 600 tours par minute. C'est cette grande vitesse qui a permis d'adopter la fréquence relativement élevée de 60 périodes par seconde.

Des transformateurs élèvent la tension de 330 à 10000 volts au départ de la ligne.

Une génératrice à double courant est en apparence identique à un convertisseur; en réalité, elle en diffère essentiellement par ses constantes internes.

Dans la génératrice à double courant, le courant continu et le courant polyphasé circulent dans le même sens; la réaction d'armature et la distorsion du champ qui en résulte sont dues à la somme de ces deux courants. La section des conducteurs de l'induit doit donc être grande, et la réaction d'armature modérée.

Dans le convertisseur, le courant d'armature est la différence entre le courant polyphasé et le courant continu; les réactions d'armature se neutralisent sensiblement. Afin d'assurer une bonne commutation, on donne aux conducteurs une faible section, et l'on adopte une réaction d'armature nominale élevée afin d'obtenir une grande puissance et une stabilité suffisante.

Une génératrice à double courant utilisée comme convertisseur est plus sujette au mouvement pendulaire, et un convertisseur fonctionnant comme machine à double courant est plus exposé à chauffer et à cracher aux balais.

Digitized by Google

II. — *Induits à pôles.*

Dans une machine à courant alternatif du genre Lontin, par exemple, à inducteur en étoile, dans laquelle toutes les bobines induites sont enroulées dans le même sens, les bobines de rang impair, d'une part, et les bobines de rang pair, d'autre part, engendrent des forces électromotrices dont les phases diffèrent d'une demi-période.

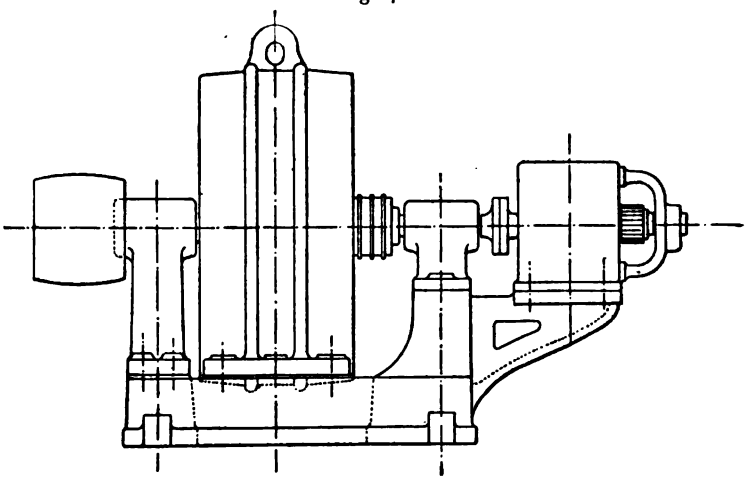
Substituons à chaque paire de bobines induites correspondant à deux pôles inducteurs consécutifs trois bobines disposées deux à deux à une distance angulaire égale au tiers de la distance angulaire de deux pôles inducteurs consécutifs *de même nom*. Nous obtiendrons de la sorte trois séries de bobines induites

1 — 4 — 7 — 10, . . ., 2 — 5 — 8, . . ., 3 — 6 — 9, . . .,

engendrant respectivement trois forces électromotrices différant deux à deux en phase d'un tiers de période.

Voici quelques données sur une petite génératrice de ce

Fig. 45.

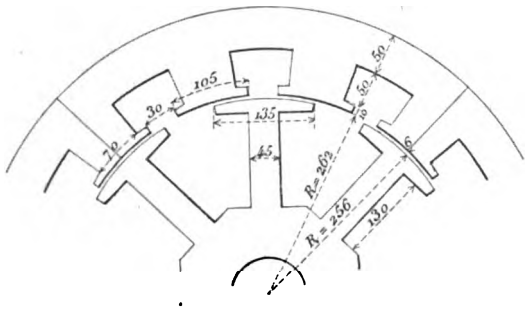


type que nous avons étudiée pour une station à courant triphasé où elle assure l'éclairage pendant les heures de faible charge (*fig.* 54).

Digitized by Google

Le noyau de tôle d'armature, extérieur, porte intérieurement 12 projections polaires (*fig.* 55). L'inducteur, mobile,

Fig. 55.



est formé d'une étoile de tôle, dont les branches portent l'enroulement excitateur.

Puissance de la machine pour $\cos\varphi = 1$, en kilowatts	12
Tension aux bornes, en volts	3000
Courant à une borne, en ampères	2,3
Tours par minute	750
Fréquence, en périodes par seconde	50

Induit :

Nombre de bobines par section	4
Nombre de spires par bobine	338
Diamètre des fils, en millimètres	1,1
Longueur totale du fil induit, en mètres	2200
Montage des quatre ondes	en série
Montage des trois sections	en étoile

Inducteur :

Nombre de pôles	8
Nombre de spires par pôle	323
Diamètre du fil, en millimètres	2,2
Longueur totale du fil inducteur, en mètres	820
Courant d'excitation, en ampères	12

Digitized by Google

L'entrefer a une longueur de 6^{mm}.

La machine porte en prolongement de son axe, sur le même bâti, une excitatrice à 60 volts.

Les bobines induites, enroulées à part sur forme, sont rapportées sur les projections polaires et maintenues en place par des coins de bois.

Ce mode de construction convient spécialement aux machines de faible puissance et de tension élevée, dont l'enroulement induit est par suite formé d'un grand nombre de spires de fil fin. Le bobinage dans des cannelures serait alors, en effet, une opération difficile et laborieuse. En outre, dans le cas de détérioration d'une ou de plusieurs bobines induites, la réparation de l'enroulement s'effectue aisément et rapidement; il suffit, en effet, d'enlever les bobines détériorées, et de les remplacer par de nouvelles construites d'avance.

Ce mode de construction, par bobines fabriquées à part, exige qu'on ménage un certain intervalle entre deux épanouissements polaires consécutifs du noyau induit. Malgré cela, la réluctance du circuit magnétique varie peu avec la position relative de l'inducteur et de l'induit. Ainsi la machine que nous venons de citer ne produit, à vitesse et charge normales, qu'un très léger ronflement.

Quelques constructeurs préfèrent cependant, lorsque les bobines ne sont pas formées d'un très grand nombre de spires, réduire les intervalles entre les épanouissements polaires à une très faible valeur, et faire le bobinage sur la machine même. La réluctance du circuit magnétique est ainsi rendue plus constante, mais les réparations à l'enroulement induit deviennent plus difficiles et plus longues.

On facilite le montage et le démontage des grandes machines à induit fixe en établissant celui-ci en deux parties boulonnées ensemble. Cette division est même obligatoire dans le cas d'induits de très grand diamètre, pour permettre leur transport.

Les induits à pôles peuvent être expédiés en deux parties, tout en portant leur enroulement complètement terminé. Dans les machines de la troisième classe, au contraire, dans lesquelles les diverses sections polyphasées se chevauchent, et toutes les fois que l'enroulement ne se compose pas sim-

Digitized by Google

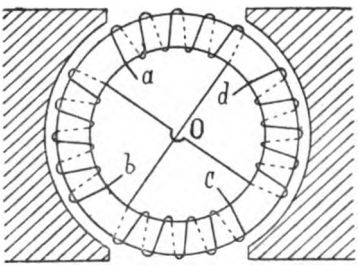
plement d'une barre par cannelure, on est obligé de terminer l'enroulement au montage sur place, en enroulant les deux bobines qui se trouvent à cheval sur les deux joints du noyau.

Au point de vue de la production de la force électromotrice les induits à pôles sont notablement inférieurs aux induits à enroulement enchaîné. En outre la forme de leur force électromotrice diffère de la forme sinusoïdale. Ce genre d'enroulement s'est peu répandu.

III. — *Induits à enroulement enchaîné.*

Divisons l'enroulement d'un anneau Gramme, par exemple, en quatre bobines égales a, b, c, d, et relions en série les bobines a et c, b et d, diamétralement opposées (*fig.* 56). Si

Fig. 56.



nous fixons les extrémités a, c, b, d à deux paires de bagues, nous obtiendrons entre celles-ci deux tensions dont les phases diffèrent d'un quart de période.

Appelons encore E_c la tension et I le courant que fournirait la machine montée comme dynamo à courant continu. Soient z le nombre de spires sur chaque moitié de l'armature et ε la force électromotrice maximum engendrée par une spire. En désignant par α l'angle que fait une spire quelconque d'une section ab par exemple avec l'axe de cette section, la tension du courant diphasé est évidemment

$$(16)\quad E = 2\frac{1}{\sqrt{2}}\,2\int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{4}} \varepsilon\cos\alpha\,\frac{z}{\pi}\,d\alpha = 2\frac{1}{\sqrt{2}}\,2\int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{4}} \frac{E_c}{2}\cos\alpha\,d\alpha = E_c.$$

Digitized by Google

La tension du courant diphasé est donc égale à celle de la dynamo à courant continu. Pour une même perte en watts dans l'enroulement induit, le courant J dans chaque section diphasée est évidemment égal à $\frac{I}{2}$. La puissance de la génératrice de courant diphasé est donc la même que celle de la dynamo à courant continu.

Remarquons que le potentiel en O est constamment nul; les deux sections diphasées pourraient par suite être réunies en O.

Au lieu de répartir uniformément l'enroulement sur la surface du noyau d'armature, logeons dans une cannelure unique toutes les spires d'une bobine, le noyau induit comportant ainsi quatre cannelures. La force électromotrice du courant diphasé sera

$$(17) \qquad E' = \frac{1}{\sqrt{2}} \varepsilon z = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} E_c = 1,11 E_c = 1,11 E.$$

On voit donc qu'au point de vue de la production de la force électromotrice il y a avantage à concentrer l'enroulement de chaque section dans autant de cannelures que l'inducteur a de pôles nord et de pôles sud.

Divisons maintenant l'enroulement de l'anneau Gramme en six bobines égales, et réunissons deux à deux en série les bobines diamétralement opposées (*fig.* 57). La force électromotrice dans chaque section est

$$(18) \qquad \left\{ \begin{aligned} E &= 2 \frac{1}{\sqrt{2}} 2 \int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{6}} \varepsilon \cos\alpha \frac{z}{\pi} d\alpha \\ &= 2 \frac{1}{\sqrt{2}} 2 \int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{6}} \frac{E_c}{2} \cos\alpha \, d\alpha = 0,707 E_c. \end{aligned} \right.$$

En montant les trois sections en étoile, la tension aux bornes est

$$(19) \qquad 0,707 E_c \times 1,732 = 1,22 E_c.$$

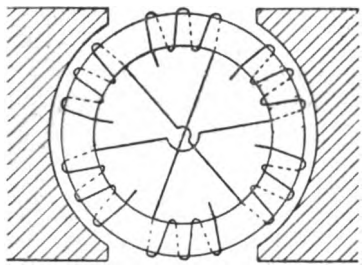
Digitized by Google

La puissance de la machine à courant triphasé est

$$(20) \qquad 3\,\frac{I}{2}\,\frac{\sqrt{2}}{2}\,E_c = 1,06\,E_c I,$$

supérieure de 6 pour 100 à la puissance de la machine utilisée soit comme dynamo à courant continu, soit comme génératrice de courant diphasé.

Fig. 57.



Si nous comparons cette disposition au montage fermé que nous avons étudié plus haut, nous voyons qu'elle exclut l'emploi du collecteur à courant continu, mais qu'elle accroît très notablement la puissance de la génératrice dans le cas du courant triphasé. Les puissances de l'armature à six bobines et de celle à trois bobines sont en effet dans le rapport

$$(21) \qquad \frac{1,06}{0,92} = 1,15.$$

Le second montage rend symétrique la réaction d'induit sur le champ.

Logeons toutes les spires d'une bobine dans une cannelure unique, le noyau d'armature comportant de la sorte six cannelures. La force électromotrice dans chaque section est alors

$$(22) \qquad E' = 2\,\frac{1}{\sqrt{2}}\,\varepsilon\,\frac{z}{3} = 0,74\,E_c.$$

En comparant les relations (18) et (22), on a

$$E' = 1,047\,E.$$

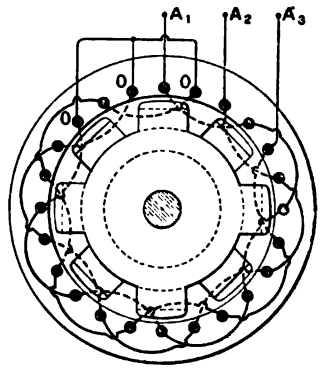
Digitized by Google

Dans la pratique on adopte en général l'enroulement en tambour. Celui-ci s'obtient en réunissant directement les brins extérieurs d'une bobine de l'anneau Gramme avec les brins extérieurs de la bobine diamétralement opposée (dans le cas d'une machine à deux pôles).

La génératrice de courant triphasé du transport d'énergie de Lauffen aux terrains de l'Exposition de Francfort, en 1891, a été construite par les Ateliers d'Œrlikon. Elle devait absorber 300 chevaux. L'induit est extérieur et fixe. Le noyau est formé d'une couronne de tôle portant 96 trous de 33^{mm} de diamètre, très voisins de la surface intérieure du noyau.

L'enroulement est formé de trois groupes de 32 barres de

Fig. 58.



cuivre de 29^{mm} de diamètre, garnies d'un tube d'amiante, et montées en série. Le commencement de chaque groupe aboutit à une borne de la machine, les trois extrémités étant reliées ensemble. Les trois sections sont donc montées en étoile (*fig.* 58).

L'ordre de montage des barres induites est le suivant :

Section I.	— Barres 1 — 4 — 7 — 10 — ...	94
Section II.	— Barres 3 — 6 — 9 — 12 — ...	96
Section III.	— Barres 5 — 8 — 11 — 14 — ...	2

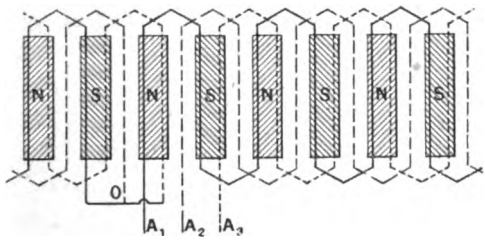
Digitized by Google

A chaque pôle inducteur correspondent trois barres induites (*fig.* 59). Les barres d'une même section sont connectées entre elles, sur les joues du noyau, au moyen de pièces de cuivre en forme de V.

L'inducteur, tournant à l'intérieur de l'induit, est calé en porte-à-faux à l'extrémité de l'arbre horizontal de la machine. Il appartient à la deuxième classe d'inducteurs. Il dérive de l'inducteur de la machine Klimenko, qui figurait à l'Exposition de Vienne (Autriche) en 1883, disposition qui a été appliquée ultérieurement par M. Mordey à ses machines à courant alternatif.

Une poulie de fonte, dont la jante a 220^{mm} de longueur axiale et 150^{mm} d'épaisseur radiale, porte sur son pourtour

Fig. 59.



deux joues de 90^{mm} de longueur et de 20^{mm} d'épaisseur, formant ainsi une gorge de 180^{mm} de largeur sur 90^{mm} de profondeur qui reçoit la bobine inductrice unique, dont l'axe coïncide avec celui de la machine. Deux couronnes d'acier coulé, munies chacune de 16 dents en forme de pied, sont boulonnées sur les joues de la poulie. Ces couronnes ont 90^{mm} d'épaisseur vers leur surface intérieure. Les surfaces polaires ont une longueur axiale de 360^{mm} et un développement de 160^{mm} suivant la circonférence.

L'inducteur possède donc 32 pôles. Chaque dent de l'une des couronnes vient s'intercaler entre deux dents de la seconde couronne. Les 16 dents d'une couronne reçoivent la polarité nord, les dents de l'autre, la polarité sud.

Digitized by Google

Voici quelques données relatives à cette génératrice :

Puissance aux bornes, en kilowatts.....	210
Tension entre une borne et le centre de l'étoile, en volts	50
Courant à une borne, en ampères.....	1400
Nombre de tours par minute	150
Fréquence, en périodes par seconde.....	46
Entrefer, en millimètres..... .	6

Induit.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres.	1764
Longeur axiale du noyau, en millimètres	380
Épaisseur radiale du noyau, en millimètres...	65
Nombre de barres induites.....	96
Diamètre des barres induites, en millimètres.	29
Montage des 32 barres de chaque section.....	en série
Montage des trois sections	en étoile

Inducteur.

Diamètre extérieur, en millimètres.....	1752
Nombre de pôles	32
Nombre de spires de la bobine unique.....	496
Diamètre du fil, en millimètres.....	5
Longueur totale du fil, en mètres.....	2030
Résistance de la bobine, à chaud, en ohms....	2

Les essais effectués sur cette machine ont montré que le procédé consistant à loger les barres induites de forte section dans la masse du noyau évite la production de courants de Foucault dans ces conducteurs.

L'induit peut être déplacé sur son socle, au moyen de crémaillères, parallèlement à l'axe de la machine, de façon à découvrir l'inducteur.

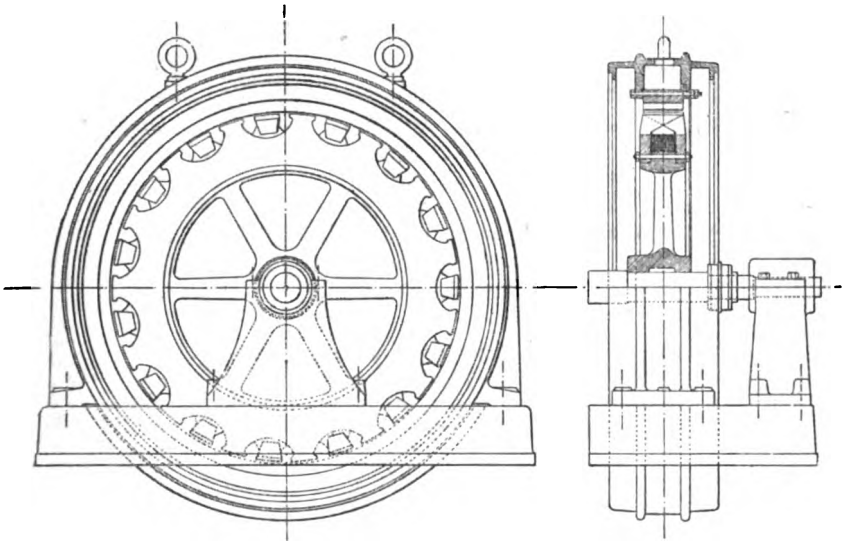
Le courant d'excitation est fourni par une petite dynamo spéciale. Il est amené à l'inducteur au moyen de deux cordes de cuivre souples passant d'une part sur deux poulies à gorge calées sur l'arbre de la machine et reliées à la bobine inductrice, et d'autre part sur deux autres poulies à gorge folles sur deux axes isolés du bâti et reliés aux bornes de l'excitatrice.

L'emploi d'une bobine unique pour produire un grand

Digitized by Google

nombre de pôles réduit à une faible valeur la puissance absorbée par l'excitation. A vide, l'excitation exige seulement une puissance de 100 watts, soit environ 14 volts et 7 ampères.

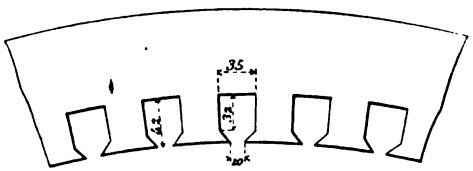
Fig. 60.



A pleine charge, le courant d'excitation est d'environ 24 ampères sous 50 volts. La régulation de cette machine est donc très défectueuse.

A pleine charge et à tension normale, la perte par friction, hystérésis et courants de Foucault, dans le noyau induit, est

Fig. 61.



estimée à 3600 watts, soit environ 1,7 pour 100. La perte due à la résistance de l'armature à pleine charge est de 3500 watts.

La figure 60 représente une machine établie par l'auteur

Digitized by Google

d'après le même mode de construction, avec inducteur à bobine unique. Le noyau induit (*fig.* 61) a une cannelure par pôle et par section. Les principales données de cette machine sont les suivantes :

Puissance aux bornes, en kilowatts.....	150
Tension aux bornes, en volts.....	190
Courant à une borne, en ampères.....	455
Tours par minute.....	200
Fréquence, en périodes par seconde.....	50

Induit.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres.	1940
Diamètre extérieur du noyau, en millimètres.	2150
Longueur du noyau, en millimètres.....	320
Nombre de cannelures.....	90
Nombre de barres par cannelure.....	3
Section des barres, en millimètres carrés..	192
Montage des 15 ondes.....	en série
Montage des trois sections.....	en triangle

Inducteur.

Nombre de pôles.....	30
Surface d'un pôle, en centimètres carrés...	32 × 15
Nombre de spires de la bobine unique.....	792
Diamètre du fil inducteur, en millimètres....	3,2
Longueur totale du fil, en mètres.....	4000
Courant d'excitation, en ampères.....	14

La longueur de l'entrefer est 6^{mm}.

L'inducteur est formé de deux couronnes d'acier munies chacune de 15 dents et boulonnées sur un volant de fonte portant la bobine. Cet inducteur est calé directement sur l'arbre d'une machine à vapeur verticale, à triple expansion, dont le volant actionne par friction une excitatrice à 140 volts.

L'excitation de cette machine absorbe, à pleine charge, environ 2 kilowatts, soit 1,25 pour 100 de la puissance sur l'arbre. Le poids de la machine est d'environ $11\,000^{kg}$.

Ce genre d'inducteur est économique comme excitation.

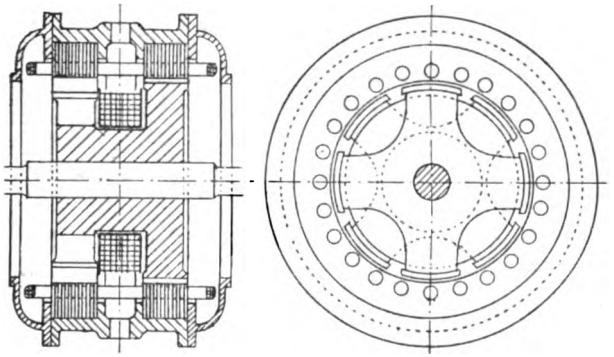
Digitized by Google

La forme des dents limite son emploi aux machines de faible longueur.

Lorsque la bobine chauffe, ses spires augmentent de longueur, et cet enroulement peut alors ne plus être entraîné par le volant. En outre, l'inductance d'une telle bobine est considérable, de sorte que, si l'excitation vient à être coupée brusquement, la bobine est très exposée à être percée par l'extra-courant. D'autre part, la dispersion magnétique est énorme. Ces défauts ont fait abandonner ce type d'inducteur.

MM. Brown, Boveri et Cie ont considérablement amélioré

Fig. 62.



ce type de machine au point de vue de la dispersion magnétique en adoptant la modification suivante :

Dans l'inducteur à bobine unique du type Lauffen, supprimons les parties de pièces polaires en porte à faux sur les couronnes d'acier. Nous obtiendrons de la sorte deux étoiles séparées par une distance égale à la longueur de la bobine excitatrice. Tous les pôles d'une étoile seront nord, tous ceux de la seconde étoile seront sud. Les pôles d'une étoile sont décalés par rapport aux pôles de l'autre étoile d'un angle égal à la moitié de l'angle de deux pôles consécutifs d'une même étoile. La partie des conducteurs d'armature comprise entre ces couronnes ne concourt pas à la production de la force électromotrice. On supprime donc les tôles du noyau dans cet intervalle.

La figure 62 représente en élévation et en coupe une

Digitized by Google

génératrice de ce type, à quatre ondes, desservant le tramway de Lugano :

Puissance aux bornes, en kilowatts.....	100
Tension aux bornes, en volts.....	5000
Tours par minute.....	600
Fréquence, en périodes par seconde.....	40

L'induit se compose de deux noyaux de tôle montés à l'intérieur d'une carcasse d'acier coulé conduisant le flux magnétique de l'un à l'autre, parallèlement à l'axe de la machine, absolument comme dans la machine unipolaire Stanley à deux induits, mais l'enroulement est différent : chaque bobine s'étend sur les deux noyaux.

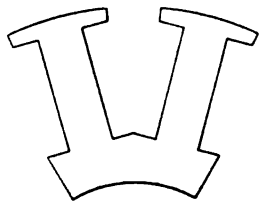
L'inducteur est formé de deux étoiles d'acier fixées aux extrémités d'un noyau également d'acier, calé sur l'arbre de la machine. Les pôles d'une étoile correspondent aux vides de l'autre étoile. La bobine excitatrice unique est mobile avec l'inducteur.

Ce type est avantageux pour les machines de faible diamètre.

Voici encore quelques données sur une machine à courant diphasé que nous avons étudiée :

L'induit extérieur et fixe est formé d'un noyau de tôle

Fig. 63.



muni de cannelures semi-ouvertes dans lesquelles est logé l'enroulement induit, en tambour. Les cannelures, analogues à celles de la figure 61, ont une largeur de 50^{mm} et une profondeur de 42^{mm}, et se prolongent en queue d'aronde jusqu'à l'ouverture, qui a 10^{mm} de largeur.

L'inducteur est formé d'une étoile composée de segments

Digitized by Google

de tôle de 1^{mm} d'épaisseur (*fig.* 63). Chaque branche de l'étoile porte une bobine excitatrice.

Puissance de la génératrice, en kilowatts...	75
Tension aux bornes, en volts.....	6000
Courant à une borne, en ampères.....	6,25
Tours par minute.....	500
Fréquence, en périodes par seconde.....	50

Induit.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres.	780
Longueur du noyau, en millimètres.....	400
Nombre de cannelures.....	24
Nombre de fils par cannelure.....	160
Diamètre des fils, en millimètres.....	2
Longueur totale du fil induit, en mètres.....	3000
Poids du fil induit, en kilogrammes.....	85
Montage des six ondes.....	en série

Inducteur.

Diamètre extérieur de l'inducteur en millimètres.....	768
Nombre de pôles.....	12
Nombre de spires par pôle.....	132
Section des conducteurs, en millimètres carrés.	20
Poids total du cuivre inducteur, en kilogrammes.....	350
Courant d'excitation, en ampères.....	32

Le poids total de la machine est d'environ 3800^{kg}.

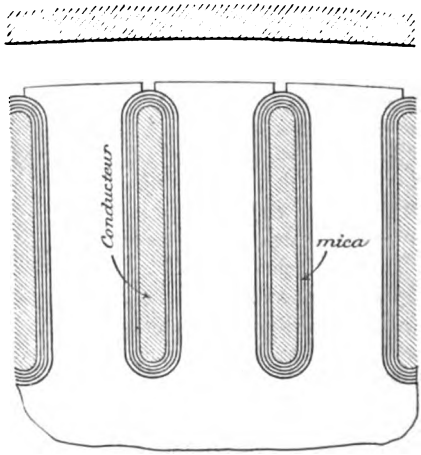
Génératrices de courant diphasé de l'usine du Niagara. — Ces machines sont à axe vertical. L'induit, *intérieur*, est *fixe*. Il est formé d'une couronne de tôle munie de cannelures recevant chacune une barre de cuivre méplate de 50^{mm} de hauteur et de $5^{mm},5$ d'épaisseur, isolée au mica (*fig.* 64). Ces cannelures, semi-ouvertes, ont une largeur de 11^{mm} et une profondeur de 58^{mm}. Le noyau de tôle est fixé sur un bâti de fonte portant deux boitards de l'arbre. L'inducteur,

Digitized by Google

extérieur et *mobile,* est formé d'une culasse annulaire d'acier qui porte intérieurement 12 pôles de tôle recevant chacun

Fig. 64.

PÔLE



une bobine excitatrice. L'entrefer, ou jeu entre le noyau induit et les surfaces polaires, est de 18 millimètres.

La vitesse du champ, sur la surface du noyau d'armature, est d'environ $39^{m},8$ par seconde.

Voici quelques indications complémentaires sur ces machines :

Puissance absorbée, en chevaux.....	5000
Puissance aux bornes, en kilowatts.....	3500
Tension aux bornes, en volts.....	2300
Courant à une borne, en ampères.....	775
Tours par minute.....	250
Fréquence, en périodes par seconde.....	25

Induit.

Diamètre extérieur du noyau, en millimètres.	3040
Longueur axiale du noyau, en millimètres..	710
Nombre de cannelures.....	360
Nombre de barres par cannelure.....	1
Section d'une barre, en millimètres carrés..	270
Montage des barres d'une section.....	en série

Digitized by Google

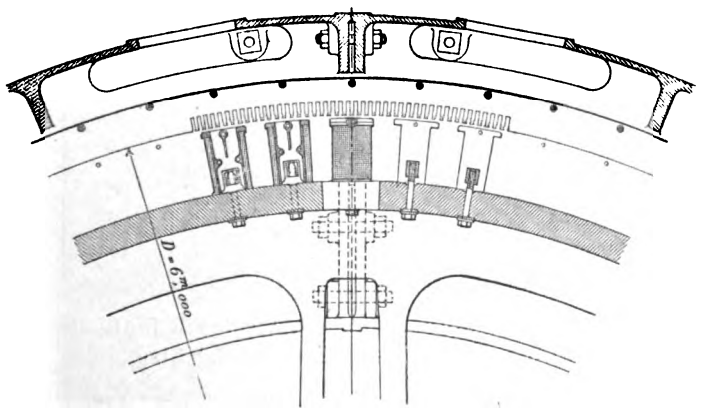
Inducteur.

Nombre de pôles	12
Puissance absorbée par l'excitation, en kilowatts	7,5

En passant de la marche à vide à la pleine charge le courant d'excitation doit être augmenté de 25 pour 100 environ, La puissance absorbée par hystérésis et courants de Foucault est de 32 kilowatts. La perte par résistance de l'enroulement induit, à pleine charge, est de 29 kilowatts. Le rendement électrique atteint environ 98 pour 100. Le courant de court-circuit pour l'excitation à pleine charge est d'environ deux fois le courant à pleine charge. La régulation est de 30 pour 100; c'est-à-dire que si, la machine étant excitée de façon à fournir la tension normale à vide, on vient à lui faire débiter le courant de pleine charge avec $\cos\varphi = 1$, en maintenant la vitesse normale, la tension aux bornes baisse de 30 pour 100.

Machine Siemens et Halske à courant triphasé (Exposition de Paris, 1900). — Cette génératrice, commandée directe-

Fig. 65.



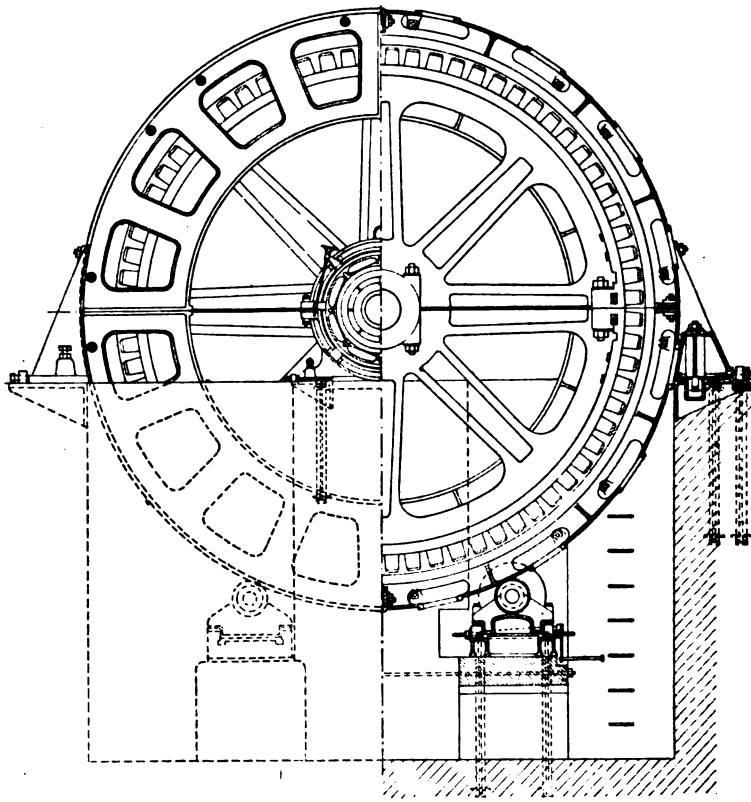
ment par une machine à vapeur à triple expansion de 2000 chevaux, produit 2000 kilovoltampères pour $\cos\varphi = 0,7$. Elle est

Digitized by Google

représentée en élévation sur la figure 66. La figure 65 en est une coupe normale à l'axe.

L'induit, extérieur et fixe, est formé d'un noyau composé de segments de tôle de $0^{mm},5$ d'épaisseur porté par un bâti circulaire de fonte en quatre parties boulonnées ensemble.

Fig. 66.



Cette carcasse est renforcée par deux cercles de fonte ajourés. Deux galets forment supports inférieurs réglables.

Puissance de la machine, en kilowatts.....	2000
Tension aux bornes, en volts.....	2200
Courant à une borne, en ampères.....	525
Nombre de tours par minute.....	83,5
Fréquence, en périodes par seconde.....	50

Digitized by Google

Induit.

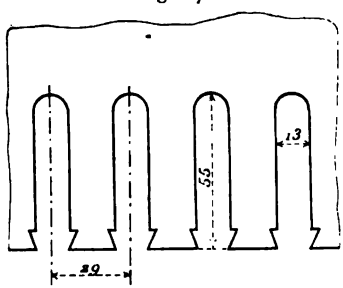
Diamètre intérieur du noyau, en millimètres.	6000
Longueur du noyau, en millimètres.....	600
Épaisseur du noyau, en millimètres.....	150
Nombre de cannelures.....	648
Largeur des cannelures, en millimètres.....	13
Profondeur des cannelures, en millimètres..	55
Nombre de barres par cannelure.....	1
Section des barres en millimètres carrés	$7 \times 44 = 308$
Montage des barres d'une section.....	en série
Montage des trois sections.....	en étoile
Poids total du cuivre induit, en kilogrammes.	2400

Inducteur.

Nombre de pôles.....	72
Nombre de spires par pôle.....	40
Section des conducteurs, en millimètres carrés.	92
Résistance totale, à chaud, en ohms.....	1
Tension maximum d'excitation, en volts.....	210
Puissance moyenne d'excitation, en kilowatts.	28
Puissance maximum d'excitation, en kilowatts.	42
Poids total du cuivre inducteur, en kilogrammes.....	4000

Les barres induites sont isolées au mica, et logées dans les cannelures ouvertes (*fig.* 67), dans lesquelles elles sont

Fig. 67.



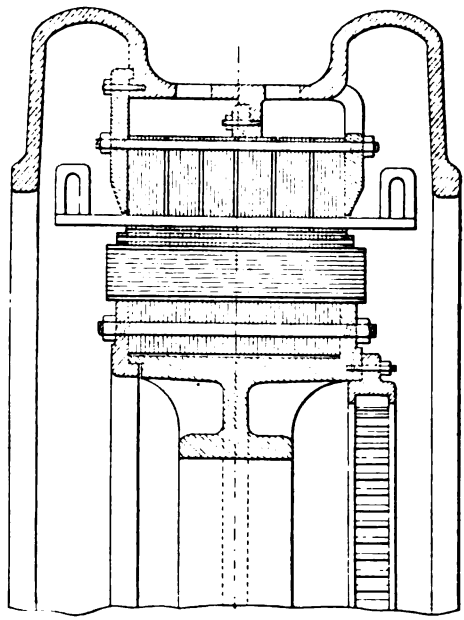
assujetties par des coins de bois. Elles sont connectées entre elles par des pièces de cuivre en forme de V.

Digitized by Google

L'inducteur est formé d'un volant de fonte à huit bras, en deux parties assemblées par huit boulons. Les noyaux de tôle ont 600^{mm} de longueur axiale et 100^{mm} de largeur. Ils portent deux joues de bronze assemblées par trois boulons. Ils présentent vers la base une mortaise dans laquelle vient se loger une barre d'acier carrée servant d'écrou à quatre vis qui traversent la jante du volant et fixent de la sorte le pôle sur cette pièce. L'enroulement inducteur est formé d'un ruban de cuivre de 4^{mm} d'épaisseur et de 23^{mm} de largeur enroulé sur champ.

Machine à courant triphasé de l'*Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft* [Exposition de Paris, 1900 (*fig.* 68 et 69)]. —

Fig. 68.

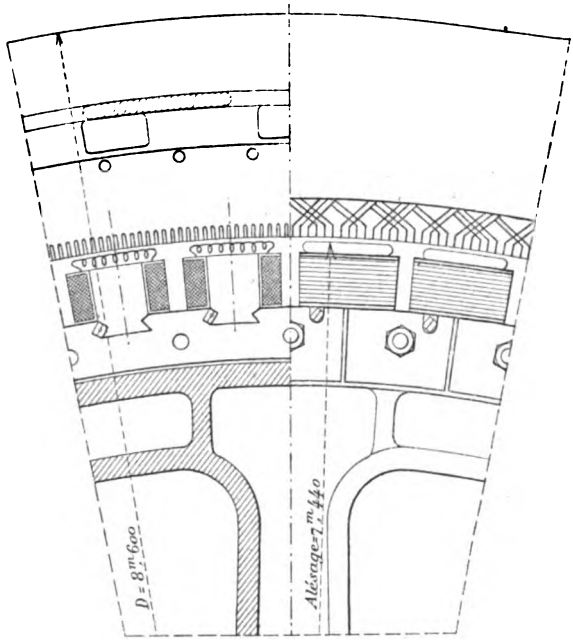


L'induit, extérieur, est fixe. Le noyau est formé de six paquets de tôle ménageant entre eux cinq canaux de ventilation. L'enroulement induit est constitué par des barres de cuivre méplates de 27^{mm} × 5^{mm} isolées au moyen d'un tube de micanite

Digitized by Google

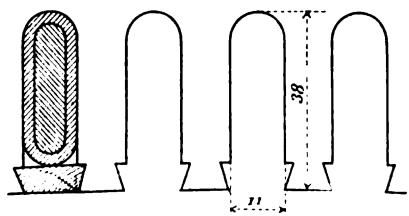
de 3mm d'épaisseur. Ces barres sont logées dans des cannelures ouvertes, et connectées entre elles par des pièces en V

Fig. 69.



de section un peu inférieure à celle des barres. Le noyau porte quinze cannelures par pôle (*fig.* 70).

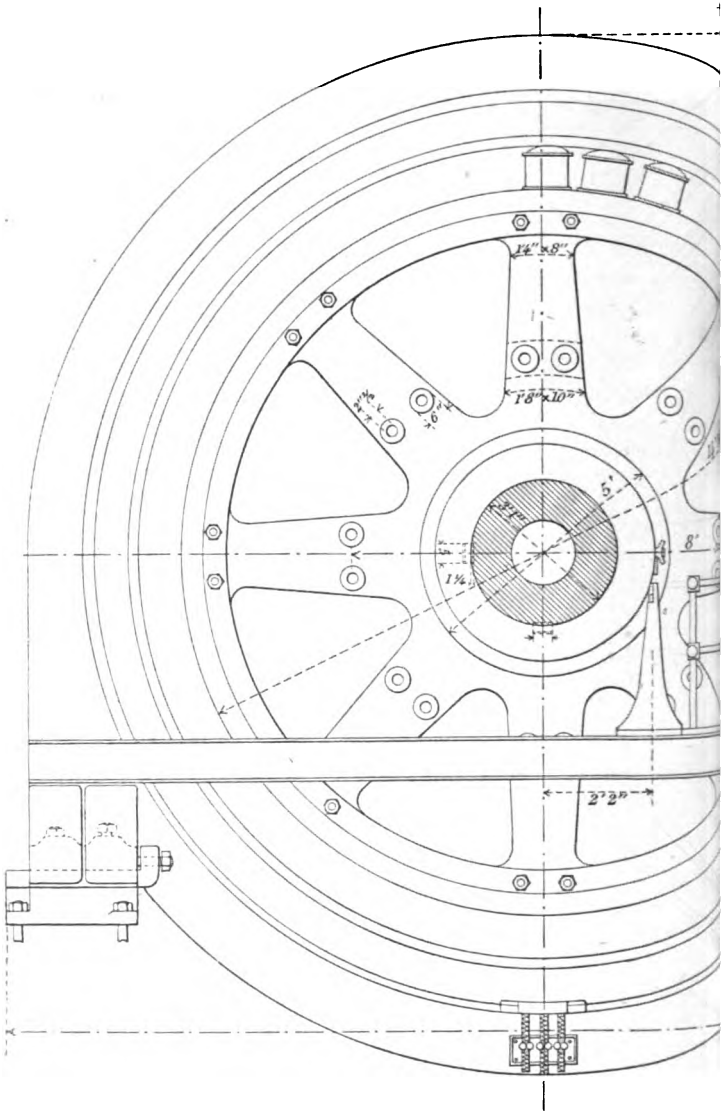
Fig. 70.



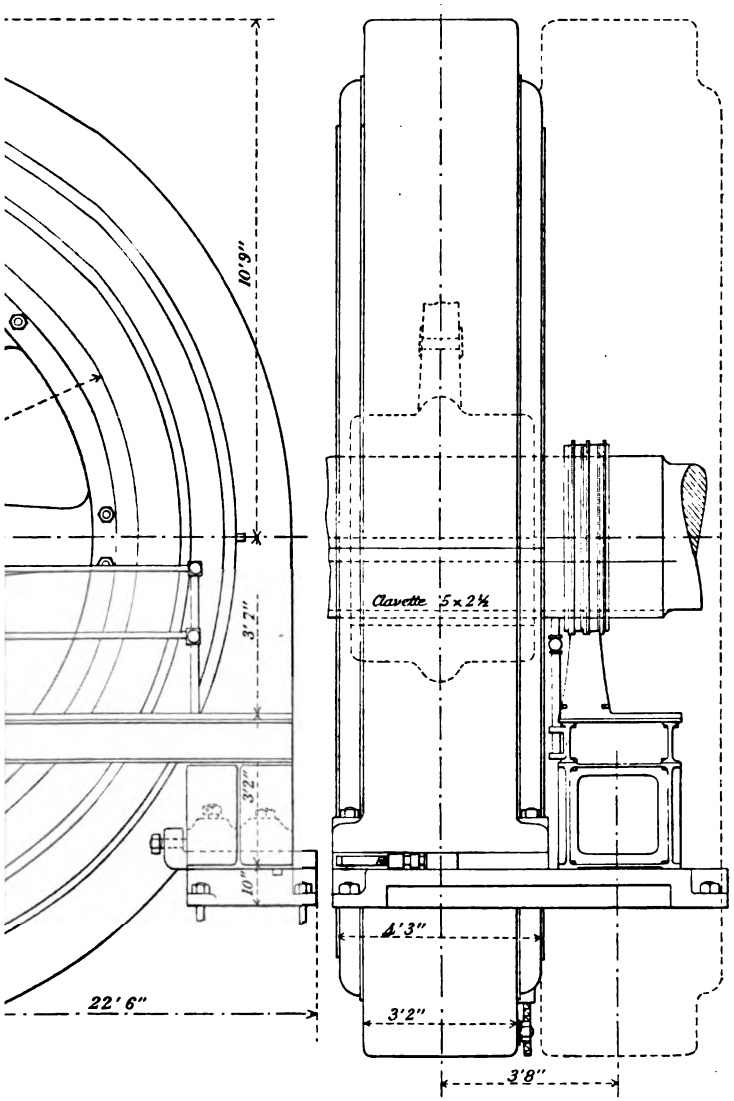
L'inducteur est formé d'un volant de fonte à douze bras. La carcasse magnétique est constituée par une couronne de

Digitized by Google

Fig



Digitized by Google



Digitized by Google

tôle ayant autant de rainures en queue d'aronde qu'il y a de pôles. Ceux-ci sont également en tôle; leur extrémité, en queue d'aronde, vient se loger dans la rainure et est assujettie au moyen d'une double clavette et d'un boulon. L'une des joues du volant est constituée par 72 plaques boulonnées. Chaque bobine de l'inducteur, enroulée sur carcasse, se trouve de la sorte aisément démontable.

L'entrefer est égal à 11^{mm}.

Puissance de la machine, en kilowatts.....	3000
Tension aux bornes, en volts.....	6000
Courant à une borne, en ampères.....	290
Tours par minute.....	83,5
Fréquence, en périodes par seconde.....	50

Induit.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres.	7440
Longueur du noyau, en millimètres.....	560
Epaisseur radiale du noyau, en millimètres.	250
Nombre de cannelures.....	1080
Profondeur des cannelures, en millimètres..	38
Largeur des cannelures, en millimètres....	11
Nombre de barres par cannelure.....	1
Section des barres, en millimètres carrés...	130
Montage des 360 barres d'une section.....	en série
Montage des trois sections.....	en étoile

Inducteur.

Nombre de pôles.....	72
Puissance absorbée par l'excitation, à pleine charge, en kilowatts.....	24

L'épanouissement polaire est perforé de cinq trous oblongs et de deux trous ronds recevant cinq tiges de cuivre méplates et deux tiges rondes reliées aux extrémités par des barres méplates : c'est l'amortisseur Hutin et Leblanc.

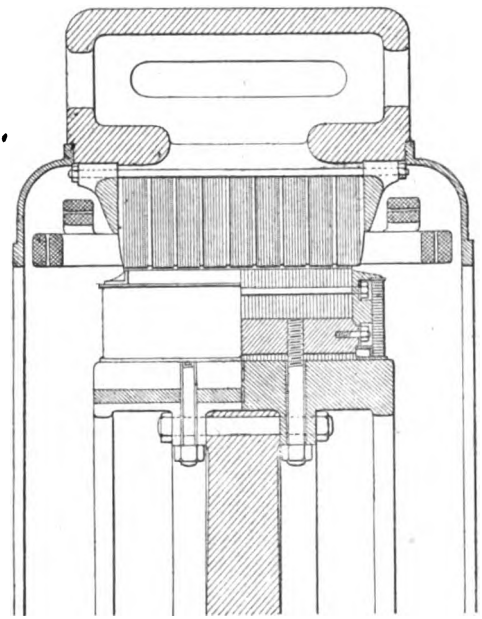
La vitesse du champ est d'environ $32^{m},5$ par seconde. L'excitation à pleine charge absorbe 0,8 pour 100 de la puissance aux bornes. L'excitatrice à huit pôles est calée sur l'extrémité de l'arbre de la génératrice. Pour $\cos\varphi = 0,9$

Digitized by Google

la puissance développée par la machine à vapeur horizontale à quatre cylindres est d'environ 4000 chevaux. Le degré d'irrégularité de cette machine avec toutes les masses en mouvement est de $\frac{1}{300}$.

Génératrice de courant triphasé du Métropolitain de New-York. — L'usine comprend 11 génératrices de 5000 chevaux, construites par la *General Electric Company* (*fig.* 71 et 72).

Fig. 72.



L'induit, extérieur et fixe, est porté par une carcasse de fonte de $6^{m},500$ de diamètre extérieur. Le noyau de tôle a six cannelures par pôle. Ces cannelures sont rectangulaires et ouvertes; elles ont une profondeur de 95^{mm} et une largeur de 32^{mm}. Les bobines induites sont formées d'un câble et sont construites sur moule. L'armature est ventilée par huit couronnes de canaux.

Digitized by Google

La poulie de l'inducteur à pôles alternés est en cinq pièces. Une étoile de fonte en une pièce, à huit bras, est calée sur l'arbre d'acier de 920^{mm} de diamètre au moyen de deux clavettes de $127^{mm} \times 32^{mm}$, disposées à 90°. La jante formant culasse se compose de quatre demi-cercles d'acier coulé, assemblés deux à deux au moyen d'éclisses à deux têtes et boulonnés sur les extrémités des bras de façon que leurs joints soient croisés.

Les noyaux polaires sont formés de tôles serrées entre deux joues de bronze à l'aide de boulons. L'assemblage de ces noyaux avec la jante est analogue à celui représenté par la figure 65 : une mortaise sert de logement à une barre d'acier dans laquelle pénètrent deux fortes vis traversant la jante d'acier.

Dans le but d'obtenir une force électromotrice sinusoïdale à vide, on a donné aux surfaces polaires une forme telle que la longueur de l'entrefer varie entre 8^{mm} au milieu du pôle et $17^{mm},5$ à l'extrémité des cornes polaires. Grâce à cette forme et à la distribution de l'enroulement, la tension en charge reste encore sensiblement sinusoïdale.

Le courant d'excitation est amené à l'inducteur par des balais de charbon frottant sur deux bagues de fonte.

Afin que les à-coups sur la génératrice ne fatiguent pas l'arbre, le volant de la machine à vapeur n'est pas calé sur cet arbre. Il porte un moyeu de grand diamètre qui est fixé latéralement sur les bras de l'inducteur par seize boulons de 64^{mm} de diamètre disposés sur un cercle de $2^{m},400$ de diamètre.

L'induit peut être déplacé sur glissières suivant l'axe, pour permettre la visite de l'inducteur et de l'armature.

Le poids total de la machine est d'environ 125 tonnes, dont la moitié appartient à la partie tournante. La brassure du volant pèse 17 tonnes.

Puissance de la machine, en kilowatts.....	3500
Tension aux bornes, en volts.....	6600
Courant à une borne, en ampères.....	300
Tours par minute.....	75
Fréquence, en périodes par seconde.....	25

Digitized by Google

Induit.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres.	5000
Longueur du noyau, en millimètres.....	750
Épaisseur radiale du noyau, en millimètres.	250
Nombre de cannelures.....	240
Montage des 20 ondes.....	en série
Montage des trois sections.....	en étoile
Perte de puissance dans l'enroulement, en kilowatts.....	26,5
Perte de puissance dans le fer, calculée, en kilowatts.....	62

Inducteur.

Nombre de pôles.....	40
Résistance de l'enroulement, en ohms.....	0,33
Courant d'excitation à vide, pour 6600 volts, en ampères.....	275
Courant d'excitation à pleine charge, pour 6600 volts et $\cos\varphi = 1$, en ampères.....	300
Tension du courant d'excitation, en volts..	100

La vitesse périphérique de l'inducteur est $19^{m},6$ par seconde.

Pour la tension de 6600 volts aux bornes, à pleine charge et pour $\cos\varphi = 1$, le courant d'excitation est supérieur d'environ 10 pour 100 au courant d'excitation à vide. Si la machine étant à pleine charge, $\cos\varphi = 1$, et excitée de façon à fournir 6600 volts aux bornes, on vient à supprimer la charge sans modifier la vitesse ni l'excitation, la tension aux bornes monte d'environ 5 pour 100.

Voici les rendements calculés pour différentes charges sans tenir compte des pertes par frottement et par ventilation :

	En pour 100.
A 25 pour 100 de surcharge.....	97
A pleine charge.....	96,7
A 75 pour 100 de la pleine charge.....	96,2
A demi-charge.....	94,8
A 25 pour 100 de la pleine charge.....	90,8

Les excitatrices peuvent fournir 125 volts afin de permettre

Digitized by Google

de compenser la réaction produite par des charges inductives.

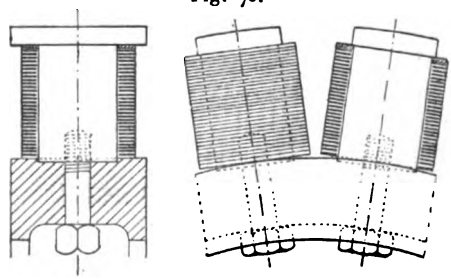
L'enroulement induit est essayé à la tension de 20000 volts.

Détails de construction des inducteurs à pôles alternés. — Les noyaux d'inducteur de tôle réduisent la perte par courants de Foucault. On les a constitués tout d'abord par des empilages de tôles découpées suivant la figure 63, les joints des couronnes successives étant croisés; l'ensemble est serré au moyen de boulons. Ce mode de construction exige que le bobinage soit exécuté sur la machine même, opération longue et coûteuse; en outre le remplacement d'une bobine détériorée est peu commode. On a été conduit de la sorte à établir les projections polaires de façon qu'elles puissent être séparées de la culasse, et de manière que les bobines puissent être construites à part. Nous avons indiqué plusieurs exemples de ce mode de construction.

D'autre part, on a reconnu que les pôles massifs ne donnent pas lieu, en général, à des pertes de puissance par courants de Foucault capables de nuire au bon fonctionnement ni d'abaisser notablement le rendement de la machine, et qu'en outre ils facilitent l'accouplement en parallèle en agissant, dans une certaine mesure, comme amortisseurs.

On emploie fréquemment le mode de construction adopté par M. Ferranti dans ses machines à courant alternatif de Portsmouth (*fig.* 73). Les projections polaires sont formées

Fig. 73.



de noyaux d'acier cylindriques munis à une extrémité d'un épanouissement polaire et à l'autre extrémité d'une tige cylindrique de plus faible diamètre qui vient s'engager dans la

Digitized by Google

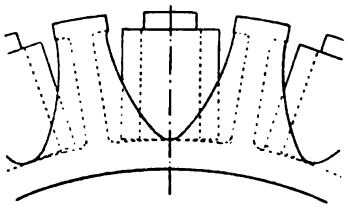
jante d'un volant de fonte ou d'acier, et se termine par une partie filetée, avec écrou. Cette tige peut être remplacée par une vis. Le noyau polaire porte un têton qui vient se loger dans un trou pratiqué dans la surface de contact de la jante afin d'empêcher le pôle de tourner autour de son axe.

La bobine est formée d'un ruban de cuivre enroulé de champ autour du noyau. L'isolation entre deux spires consécutives est faite avec du carton, de la fibre ou de la toile. A l'extérieur le cuivre est nu.

Lorsque le noyau, au lieu d'être cylindrique, est allongé, on le munit souvent d'une tige cylindrique encastrée dans la culasse afin de renforcer l'assemblage.

La figure 74 représente une disposition proposée par

Fig. 74.



M. Brown, consistant à faire venir de fonte avec la culasse de l'inducteur les projections polaires de deux en deux, et à rapporter dans chaque intervalle de deux dents un noyau d'acier, cylindrique ou ovale, muni d'une bobine, les premières projections polaires ne portant aucun enroulement. Toutes les bobines donnent la même polarité à leur noyau.

IV. — *Machines unipolaires.*

Considérons une génératrice à induit fixe enroulé en tambour et à inducteur à pôles alternativement nord et sud. Supprimons les pôles sud, par exemple, et ménageons le retour du flux magnétique émis par les pôles nord dans le noyau induit à travers le bâti de l'armature et la culasse de l'inducteur : nous aurons une machine *unipolaire;* tous les pôles

Digitized by Google

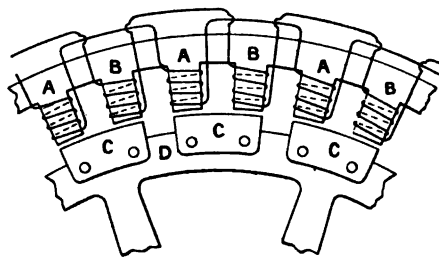
du noyau tournant auront même polarité, et pourront être engendrés par une bobine unique qui pourra être fixe.

Cette disposition permet donc de construire des machines dont les enroulements induit et inducteur sont fixes, et dont la seule partie mobile est une carcasse magnétique d'acier, ou simultanément d'acier et de fonte; de là le nom de machines *à fer tournant* que l'on donne souvent à ces génératrices; ce dispositif supprime par conséquent les bagues et les balais pour l'amenée du courant inducteur. La prise du courant induit et l'amenée du courant inducteur s'effectuent simplement au moyen de bornes fixes.

Parmi les premières machines à courant alternatif dans lesquelles les enroulements induit et inducteur sont fixes, nous citerons celles de Kingdon, Mordey, Elihu Thomson et Stanley.

La machine Kingdon (*fig.* 75) se compose d'un anneau de

Fig. 75.



tôle muni de projections polaires A, B. Les projections A portent l'enroulement excitateur; les projections B reçoivent l'enroulement induit.

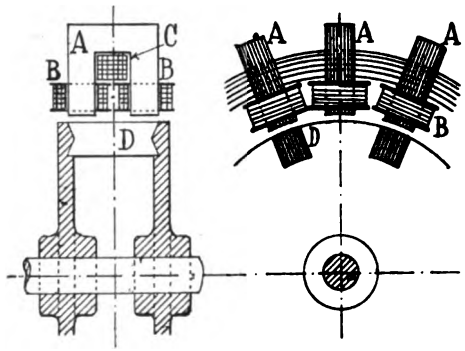
Un volant D porte sur sa jante une série de pièces C formées de lames de tôle perpendiculaires à l'axe de la machine, et dont la longueur correspond à deux projections polaires consécutives. Le déplacement de cette pièce mobile fait varier la réluctance du circuit magnétique et, par suite, engendre des forces électromotrices alternatives dans les bobines B.

La machine Mordey se compose d'une série de noyaux de

Digitized by Google

tôle A fixes, en forme d'U, dont les branches portent les bobines induites B (*fig.* 76). Une bobine unique C excite tous

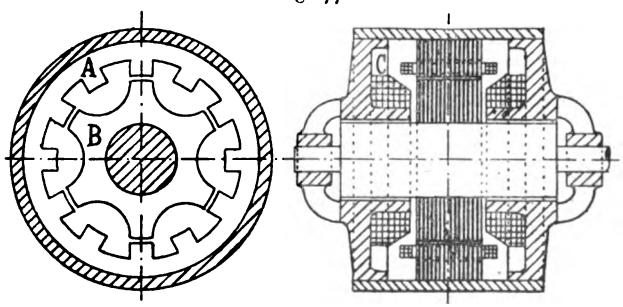
Fig. 76.



les éléments A dont la réluctance est rendue variable par la rotation d'un tourteau de fonte portant sur sa circonférence des faisceaux de tôle D en nombre égal à la moitié de celui des pièces A.

L'induit de la machine Elihu Thomson à courant alternatif (*fig.* 77) est fixe. Il se compose d'une couronne de tôle A

Fig. 77.



dont la surface intérieure porte des projections radiales sur lesquelles sont fixées les bobines induites. Une étoile de tôle B est portée par un cylindre de fer ou d'acier calé sur

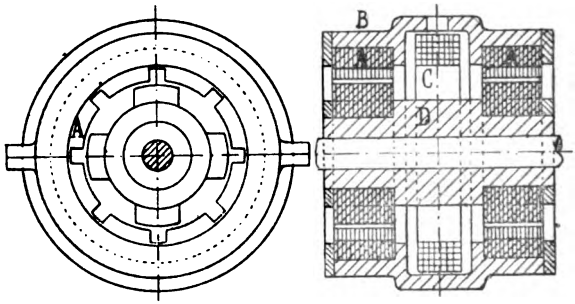
Digitized by Google

l'arbre de la machine. Deux bobines C, C aimantent dans le même sens le noyau induit.

Le nombre des bobines induites est double de celui des saillies polaires de la pièce mobile B.

La machine Stanley est à courant alternatif ou à courant diphasé (*fig.* 78). Elle possède deux induits formés chacun

Fig. 78.



d'une couronne de tôle A fixée à l'intérieur d'un bâti circulaire d'acier B, qui réunit magnétiquement les deux noyaux. Ceux-ci portent sur leur surface intérieure des cannelures qui reçoivent l'enroulement induit fait sur forme. Une bobine inductrice unique C se trouve logée entre les deux induits. Un noyau d'acier D, calé sur l'arbre de la machine, porte à ses extrémités deux couronnes de tôle dentées.

Le flux engendré par la bobine excitatrice traverse l'un des noyaux induits, le bâti annulaire d'acier, le second noyau et se ferme à travers les deux entrefers par le noyau d'acier et ses deux couronnes dentées. Cette pièce mobile entraîne dans son mouvement les faisceaux magnétiques attachés aux dents, et engendre par suite des forces électromotrices dans l'enroulement de l'armature.

Dans le cas d'une machine à courant alternatif, le nombre de dents de chaque noyau induit est double du nombre de pôles d'une couronne dentée de la pièce mobile. Dans le cas d'une machine à courant diphasé, chaque induit produit l'un des deux courants.

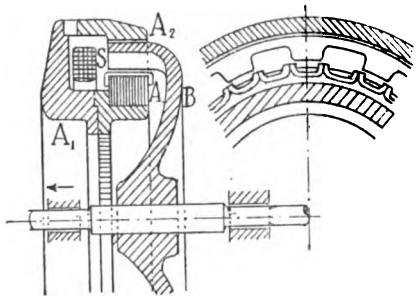
Pour permettre la mise en place et l'enlèvement de la

Digitized by Google

bobine excitatrice, le bâti annulaire d'acier ainsi que les deux induits sont en deux parties boulonnées ensemble.

La machine unipolaire Thury (*fig.* 79), à courant alternatif ou à courant polyphasé, se compose d'une pièce fixe A_1 d'acier, en forme de C, sur laquelle est fixé un noyau de tôle lisse A portant l'enroulement induit. Une pièce d'acier coulé B, calée sur l'arbre de la machine, affecte la forme d'une cloche tournée sur sa surface extérieure, et porte des dents sur sa surface intérieure. Cette pièce B s'engage entre le bâti d'acier

Fig. 79.



fixe et le noyau induit. Une bobine S engendre un flux qui parcourt les pièces A_1 et A_2, passe par la cloche B, traverse les dents et pénètre dans le noyau de tôle. La pièce B, en tournant, entraîne les faisceaux de lignes de force émanant de ses dents, et produit l'induction dans l'enroulement de l'armature.

Le bâti A_1 peut être déplacé suivant l'axe. La partie annulaire est en deux parties boulonnées ensemble. En soulevant la demi-couronne A_2, et en déplaçant A_1 vers la gauche, on peut retirer la bobine excitatrice S. La pièce intérieure peut tourner autour de l'axe à l'aide d'un pignon engrenant avec la couronne dentée disposée à l'intérieur. En faisant faire un demi-tour à cette pièce on peut visiter l'enroulement induit tout entier.

Ces machines n'absorbent qu'une très faible puissance pour leur excitation. Elles se prêtent bien à l'obtention de fréquences différentes : ce résultat s'obtient en modifiant le

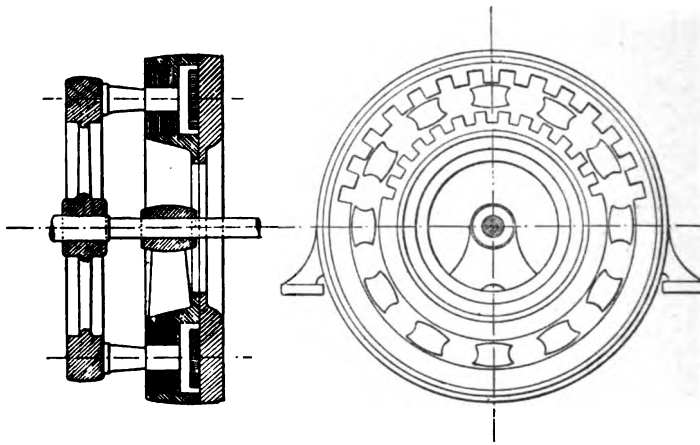
Digitized by Google

nombre de dents de la cloche mobile et le nombre de bobines induites.

L'usine centrale de Strasbourg renferme des génératrices unipolaires à courant triphasé de 400 et de 200 chevaux, construites par la Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft de Berlin.

La machine de 400 chevaux (*fig.* 80) se compose d'une car-

Fig. 80.



casse d'acier circulaire fixe, en forme de C, portant deux induits concentriques. La partie mobile est actionnée directement par le volant d'une machine à vapeur verticale. La jante de ce volant porte latéralement 20 pièces formées essentiellement de tôle (Polhörner), qui viennent s'engager entre les deux induits.

Chacun des noyaux d'armature porte 60 dents terminées en queue d'aronde recevant chacune une bobine induite. Chaque groupe de trois dents d'une armature correspond à une pièce polaire. Les induits de ces machines sont donc à pôles.

A l'intérieur du bâti en C est logée la bobine excitatrice unique dont le plan est perpendiculaire à l'axe de la machine.

Les pièces polaires entraînent dans leur mouvement des doubles faisceaux de lignes de force qui produisent l'induction dans les enroulements.

Digitized by Google

Afin de rendre plus constante la réluctance du circuit magnétique, à chaque dent de l'un des induits correspond une cannelure du second induit. Les saignées des cannelures étant très étroites, les bobines induites sont enroulées sur les dents elles-mêmes.

Nous empruntons à M. von Dolivo Dobrowolsky [1] les données suivantes sur ces machines à courant triphasé :

Puissance aux bornes, en kilowatts	280
Tension aux bornes, en volts	2750
Tours par minute	150
Fréquence, en périodes par seconde	50
Nombre de pièces polaires	20
Diamètre du cercle passant par l'axe des pièces polaires, en millimètres	2730
Poids du cuivre sur les deux armatures, en kilog.	200
Poids du cuivre de la bobine inductrice, en kilog.	750
Poids des deux noyaux induits, en kilog	2000
Poids des 20 pièces polaires, en kilog	800
Poids de la carcasse d'acier, en kilog	6000
Poids total du fer, arbre et paliers non compris, en kilog	8800
Puissance absorbée par l'excitation, en kilowatts	4
Puissance absorbée par l'excitation, en pour 100	1,4
Perte de puissance dans les deux enroulements induits, en pour 100	2
Perte par hystérésis, en pour 100	1,3

Le rapport des ampères-tours efficaces d'une bobine induite aux ampères-tours de la bobine excitatrice est égal à 1 : 15.

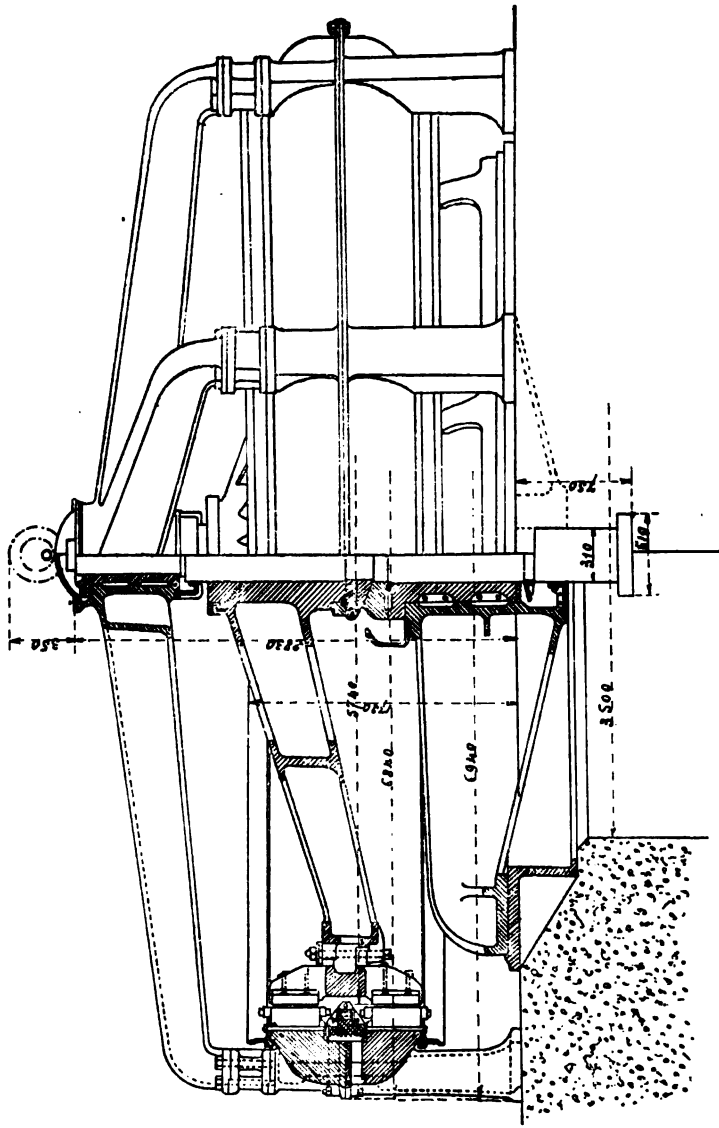
La figure 81 représente une machine unipolaire à courant triphasé construite par la Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft pour l'installation de Rheinfelden. Les principales conditions de fonctionnement de cette machine sont les suivantes :

Puissance aux bornes, en kilowatts	560
Tension aux bornes, en volts	6800
Tours par minute	55
Fréquence, en périodes par seconde	50

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 7 février 1895.

Digitized by Google

Fig. 81.



La figure 82 représente une machine unipolaire à courant

Digitized by Google

triphasé étudiée par l'auteur pour absorber 220 chevaux.

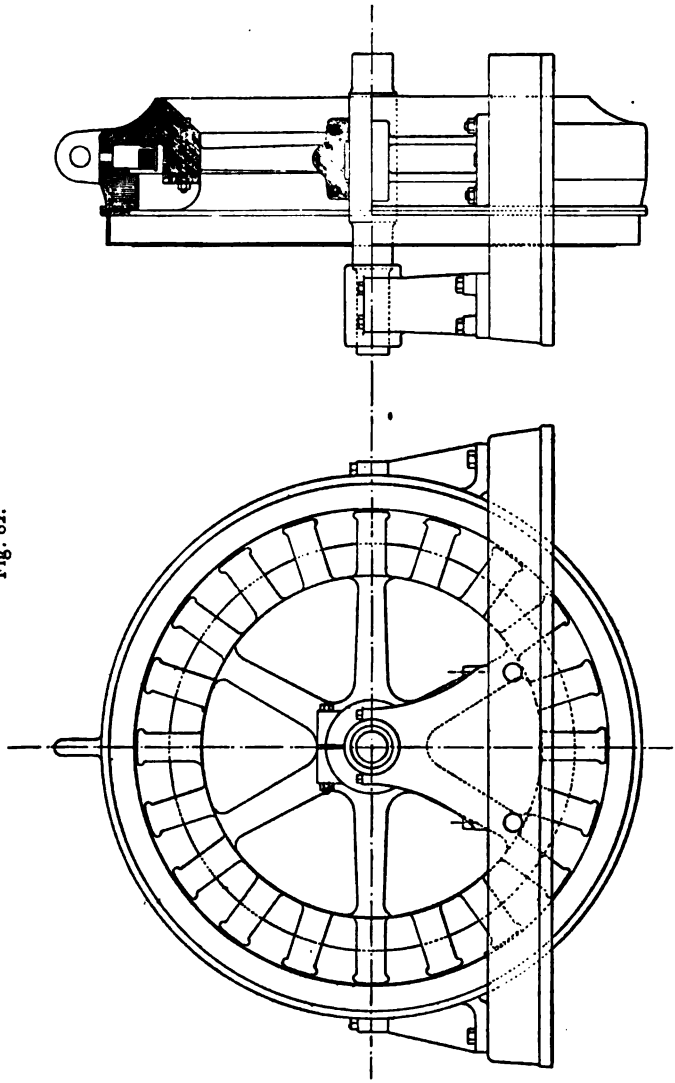


Fig. 82.

Cette machine est du type à induit unique. Le noyau d'armature est muni de cannelures semi-fermées, représentées

Digitized by Google

sur la figure 61, qui reçoivent l'enroulement en tambour, enchaîné.

Voici les principales données de cette machine :

Puissance aux bornes, en kilowatts	150
Tension aux bornes, en volts	3100
Courant à une borne, en ampères	28
Tours par minute	150
Fréquence, en périodes par seconde	50

Induit.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres	2600
Longueur du noyau, en millimètres	200
Nombre de cannelures	120
Nombre de fils par cannelure	35
Diamètre des fils, en millimètres	4,4
Montage des 20 ondes	en série
Montage des trois sections	en étoile
Longueur totale du fil, en mètres	2300

Inducteur.

Nombre de projections polaires	20
Nombre de spires de la bobine	480
Courant d'excitation, en ampères	28

La longueur de l'entrefer est de 8^{mm}.

Machine Farcot à courant diphasé, de l'Exposition de Paris en 1900 (*fig.* 83 et 83 *bis*). — Cette génératrice ne diffère essentiellement de la machine Stanley qu'en ce que la bobine inductrice est fixée sur la carcasse de fer tournante et est par suite mobile. Une carcasse de fonte, fixe, en quatre parties, porte deux noyaux de tôle auxquels correspondent deux séries de pôles sur l'inducteur.

Chaque noyau d'armature est muni de cannelures rectangulaires, ouvertes, dans lesquelles sont logées les bobines induites d'une section diphasée. Chaque moitié de l'armature constitue un induit à pôles.

Digitized by Google

Les pôles de l'inducteur sont en tôle. La bobine excitatrice

Fig. 83.

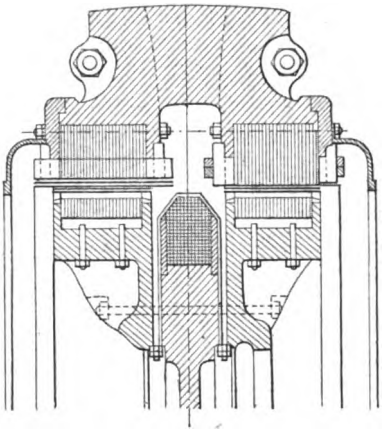
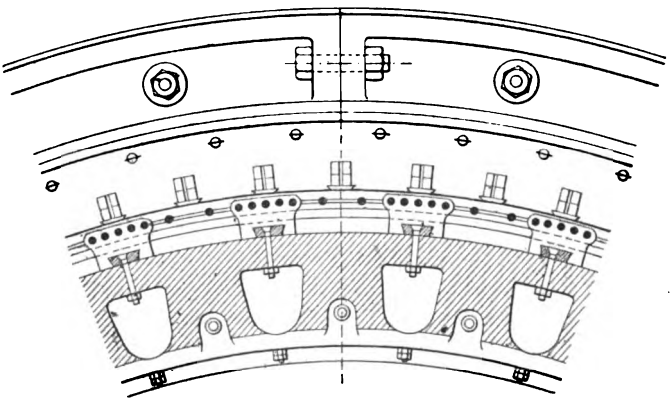


Fig. 83bis.



est fixée sur la carcasse magnétique au moyen d'étriers.

Puissance de la machine, en kilowatts.....	880
Tension aux bornes, en volts.....	2200
Courant à une borne, en ampères.....	200
Tours par minute.....	78,5
Fréquence, en périodes par seconde.....	42

Digitized by Google

Induit.

Diamètre intérieur des noyaux, en millimètres...	5515
Diamètre extérieur des noyaux, en millimètres...	5800
Longueur de chaque noyau, en millimètres.....	300
Longueur totale de l'armature, en millimètres...	980
Nombre de cannelures de chaque noyau.....	64
Nombre de bobines par section, c'est-à-dire sur chaque noyau d'armature.....	64
Nombre de spires par bobine.....	10
Résistance d'une section, à chaud, en ohms.....	0,113
Poids total de l'armature, en kilog.....	60000

Inducteur.

Nombre de pôles sur chaque couronne.....	32
Nombre de spires de la bobine.....	460
Résistance de la bobine, à chaud, en ohms.....	3,5
Diamètre extérieur de l'inducteur, en millimètres.	5502
Longueur de l'entrefer, en millimètres.....	6,5
Courant d'excitation à vide, en ampères.....	29
Courant d'excitation à pleine charge pour $\cos\varphi = 0,85$, en ampères.....	50
Poids de la bobine excitatrice, en kilog.....	5000
Poids total de l'inducteur, sans l'arbre, en kilog.	50000

L'inducteur est muni de l'amortisseur Leblanc, formé de tiges de cuivre parallèles à l'axe de la machine et reliées à leurs extrémités par deux cercles de cuivre.

Dans les machines unipolaires l'induction dans l'entrefer est naturellement élevée. Un faible décentrage de la pièce tournante produit une inégale répartition du flux sur les divers pôles qui peut exercer sur l'arbre un effort considérable. L'arbre et les coussinets doivent donc être largement calculés.

La dispersion magnétique est considérable. Le flux de dispersion non seulement réduit le flux utile comme dans les machines à pôles alternés, mais encore engendre une force électromotrice contraire dans les conducteurs qui devraient n'être soumis à aucune induction.

Digitized by Google

Ce type de machine n'est plus guère employé que dans les cas où l'on peut donner à la génératrice une très grande vitesse périphérique.

Génératrices asynchrones. — Nous verrons plus loin que l'on peut utiliser un moteur d'induction comme génératrice de courant polyphasé asynchrone en le faisant tourner à une vitesse un peu supérieure à celle du synchronisme.

PRODUCTION D'UN COURANT POLYPHASÉ AU MOYEN D'UN COURANT ALTERNATIF SIMPLE.

Au début de l'application industrielle des courants polyphasés, il existait déjà un grand nombre de distributions d'énergie par courant alternatif pour l'éclairage, et que l'on cherchait à utiliser également pour actionner des moteurs. Les moteurs synchrones à courant alternatif démarraient difficilement, même à vide, et calaient pour une surcharge peu élevée. On ne possédait d'ailleurs pas de moteurs asynchrones à courant alternatif démarrant au moins à vide. On s'est donc efforcé de transformer le courant alternatif en courant diphasé, de façon à pouvoir appliquer les moteurs à courant diphasé aux distributions existantes d'énergie par courant alternatif.

Certains industriels même, n'envisageant que le nombre restreint de deux conducteurs et la plus grande simplicité des canalisations dans les transports et distributions de *faibles puissances,* sans considérer un certain nombre d'avantages très importants des courants polyphasés, admettaient sans discussion la supériorité du courant alternatif simple sur les courants polyphasés, et avaient en vue l'emploi *provisoire* de moteurs à courant polyphasé dans les distributions à courant alternatif, en attendant la découverte de moteurs pratiques qui, à leur avis, feraient triompher définitivement le courant alternatif en supprimant les courants polyphasés qu'ils n'envisageaient qu'à titre transitoire.

Les mêmes industriels, influencés par les expressions de

Digitized by Google

diphasé et de *triphasé*, considéraient ce dernier système comme plus compliqué que le premier, auquel ils donnaient sans hésitation la préférence.

En pratique, on n'a retenu qu'un petit nombre de ces procédés de dédoublement d'un courant alternatif, qu'on a utilisés pour produire le démarrage des moteurs asynchrones à courant alternatif, ou que l'on a appliqués à certains instruments de mesure.

§ I. — Division d'un courant alternatif en deux courants différant en phase, au moyen de l'inductance.

Nous avons déjà indiqué le procédé proposé par Ferraris pour produire deux courants différant en phase d'environ un quart de période, au moyen d'un courant alternatif consistant à monter l'une des deux sections d'un moteur à courant diphasé en série avec l'enroulement primaire d'un transformateur à très faible charge, et la seconde section en série avec l'enroulement secondaire du transformateur.

On sait, en effet, que, dans un transformateur à pleine charge, le secondaire étant fermé sur une résistance simple, la phase du courant primaire est en avance sensiblement d'une demi-période, ou de 180°, sur celle du courant secondaire.

Pour une charge extrêmement faible sur le secondaire, si le circuit magnétique du transformateur ne possédait pas d'hystérésis et s'il ne s'y développait pas des courants de Foucault, le courant primaire se trouverait retardé, par rapport à la tension primaire, d'une quantité voisine d'un quart de période.

Dans la figure 84, la courbe e_1 représente la tension aux bornes primaires, Φ l'induction magnétique, i_1 le courant primaire pour une très faible charge, e_2 (ou i_2) la force électromotrice secondaire (et le courant secondaire si le circuit secondaire ne possède ni inductance ni capacité).

Si donc on monte l'un des circuits inducteurs du moteur en série avec le primaire de ce transformateur et le second circuit en série avec le secondaire, on pourra obtenir deux

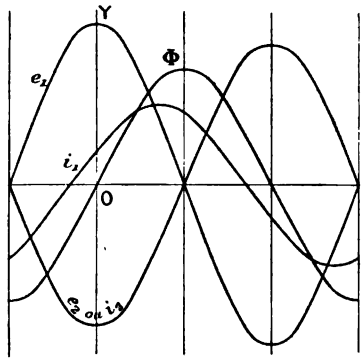
Digitized by Google

courants alternatifs présentant une différence de phase voisine d'un quart de période, pourvu que la puissance normale du transformateur soit très supérieure à la charge qu'il supportera.

En réalité, les courants de Foucault et l'hystérésis du noyau de fer du transformateur diminuent le retard de phase du courant primaire par rapport à la tension primaire.

En outre, la variabilité de la perméabilité du noyau avec la

Fig. 84.



densité d'induction magnétique déforme la courbe du courant primaire, surtout à faible charge.

Il est évident que l'emploi d'un transformateur à très faible charge entraîne, pour l'installation, un coût élevé et un très faible rendement, et par suite n'est pas industriel.

Ferraris a proposé un second procédé pour dédoubler un courant alternatif en deux courants différant en phase. Il monte en série avec l'une des deux sections d'un moteur à courant diphasé une résistance simple, et en série avec la seconde section une bobine de grande inductance.

Soient :

R_1 et L_1 la résistance et l'inductance de l'une des sections du moteur et R'_1 la résistance montée en série avec cet enroulement;

Digitized by Google

R_2 et L_2 la résistance et l'inductance de la seconde section;

R'_2 et L'_2 la résistance et l'inductance de la bobine montée en série avec cette seconde section.

On a

$$\operatorname{tang}\varphi_1 = 2\pi n \frac{L_1}{R_1 + R'_1},$$

$$\operatorname{tang}\varphi_2 = 2\pi n \frac{L_2 + L'_2}{R_2 + R'_2}.$$

La différence de phase entre les deux courants est

$$\psi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Pour que ψ fût égal à $\frac{\pi}{2}$, il faudrait qu'on eût

$$\varphi_1 = 0, \qquad \text{ou} \qquad \frac{L_1}{R_1 + R'_1} = 0,$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2}, \qquad \text{ou} \qquad \frac{L_2 + L'_2}{R_2 + R'_2} = \infty;$$

c'est-à-dire que pratiquement le circuit 1 devrait avoir une très faible inductance et une très grande résistance. Le circuit 2, au contraire, devrait avoir une très grande inductance et une très faible résistance.

Il faudrait donc monter en série avec la première section une très grande résistance, et avec la seconde section une bobine de très grande inductance et de très faible résistance.

En pratique, l'angle ψ sera donc toujours inférieur à $\frac{\pi}{2}$.

Les courants instantanés dans les deux sections sont

$$i_1 = \frac{E\sqrt{2}}{(R_1 + R'_1)\sqrt{1 + \left(2\pi n \frac{L_1}{R_1 + R'_1}\right)^2}} \sin(2\pi n t - \varphi_1),$$

$$i_2 = \frac{E\sqrt{2}}{(R_2 + R'_2)\sqrt{1 + \left(2\pi n \frac{L_2 + L'_2}{R_2 + R'_2}\right)^2}} \sin(2\pi n t - \varphi_2).$$

La condition que les phases des deux champs composants

Digitized by Google

diffèrent peu, d'un quart de période, exige, d'après ce que nous venons de voir, que l'impédance de chaque circuit soit considérable : les moyennes des courants dans les deux sections seraient donc très faibles, ainsi que les champs composants, car la force électromotrice serait en grande partie absorbée, dans un circuit, par la résistance et, dans l'autre, par la bobine de self-induction. La puissance du moteur serait donc extrêmement faible. On est par conséquent obligé, dans la pratique, d'accepter pour les deux courants inducteurs et, par suite, pour les champs composants, une différence de phase notablement inférieure à un quart de période, afin que leurs maxima aient une valeur convenable.

On applique ce procédé au démarrage des moteurs asynchrones à courant alternatif de la manière suivante : L'inducteur du moteur porte, en outre de son enroulement principal, une seconde série de bobines intercalées entre les premières, et que l'on monte en série avec une bobine de self-induction. A la mise en marche, on ferme ces deux circuits en parallèle sur les conducteurs amenant le courant alternatif. Lorsque le moteur a atteint une vitesse voisine de la vitesse normale, on coupe le circuit auxiliaire, et l'on charge le moteur. Pour réduire le courant absorbé à la mise en marche, et pour augmenter la différence de phase entre le courant principal et le courant auxiliaire, on intercale quelquefois sur l'enroulement principal un rhéostat que l'on met hors circuit après le démarrage.

§ II. — Division d'un courant alternatif simple en deux courants différant en phase, au moyen de condensateurs.

Considérons un condensateur de capacité C, relié aux deux conducteurs A, B, entre lesquels existe une tension alternative

$$e = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt. \tag{1}$$

Soit i (*fig.* 85) le courant à l'instant t dans la dérivation du condensateur. S'il ne passe aucun courant à travers le diélectrique, on a évidemment

$$i\,dt = C\,de \tag{2}$$

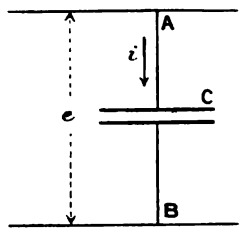
Digitized by Google

ou

$$(3) \qquad i = \mathrm{CE}\sqrt{2}\, 2\pi n \cos 2\pi n t.$$

La phase du courant i est donc en avance d'un quart de période sur celle de la tension e aux bornes du condensateur.

Fig. 85.



La moyenne efficace du courant i est

$$(4) \qquad \mathrm{I} = 2\pi n \mathrm{CE} = \frac{\mathrm{E}}{\left(\frac{1}{2\pi n \mathrm{C}}\right)}.$$

La moyenne efficace du courant dans la dérivation du condensateur est donc la même que si celui-ci était remplacé par une résistance $\frac{1}{2\pi n \mathrm{C}}$.

Si C est exprimé en farads et E en volts, I représentera des ampères.

Remarque. — Nous avons supposé le condensateur relié aux fils A et B par des conducteurs de résistance négligeable.

Considérons maintenant un circuit ayant une résistance R et une inductance L, en série avec un condensateur de capacité C et relié aux conducteurs A et B, entre lesquels existe la tension alternative e dont la moyenne efficace est E et la fréquence n.

Soient, à l'instant t, ε la tension entre les armatures du condensateur, et i le courant dans la dérivation, la moyenne

Digitized by Google

efficace de ce courant étant I (*fig.* 86). On a

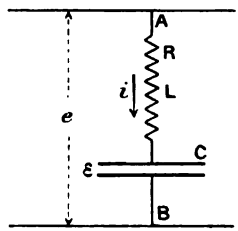
$$(1) \qquad e = \mathrm{R}\,i + \mathrm{L}\frac{di}{dt} + \varepsilon,$$

$$(2) \qquad d\varepsilon = \frac{i\,dt}{\mathrm{C}},$$

d'où

$$(3) \qquad \varepsilon = \frac{1}{\mathrm{C}}\int i\,dt.$$

Fig. 86.



En posant

$$(4) \qquad i = \mathrm{I}\sqrt{2}\sin 2\pi n t,$$

il vient

$$(5) \qquad \varepsilon = -\frac{\mathrm{I}\sqrt{2}}{2\pi n \mathrm{C}}\cos 2\pi n t.$$

Par suite, (1) devient

$$(6) \quad e = \mathrm{RI}\sqrt{2}\sin 2\pi n t + \left(2\pi n \mathrm{L} - \frac{1}{2\pi n \mathrm{C}}\right)\mathrm{I}\sqrt{2}\cos 2\pi n t.$$

Si nous posons

$$(7) \qquad \frac{2\pi n \mathrm{L} - \dfrac{1}{2\pi n \mathrm{C}}}{\mathrm{R}} = \operatorname{tang}\varphi,$$

il vient

$$(8) \quad e = \mathrm{I}\sqrt{2}\sqrt{\mathrm{R}^2 + \left(2\pi n \mathrm{L} - \frac{1}{2\pi n \mathrm{C}}\right)^2}\sin(2\pi n t + \varphi)$$

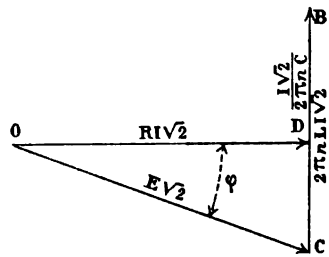
Digitized by Google

et, par suite,

$$(9)\quad \begin{cases} E = I\sqrt{R^2 + \left(2\pi n L - \dfrac{1}{2\pi n C}\right)^2} \\ \quad = \dfrac{I}{2\pi n C}\sqrt{4\pi^2 n^2 C^2 R^2 + (4\pi^2 n^2 CL - 1)^2}. \end{cases}$$

L'angle φ (*fig.* 87) représente la différence de phase entre

Fig. 87.



la tension e et le courant i. La moyenne efficace de ce courant est

$$(10)\qquad I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi n L - \dfrac{1}{2\pi n C}\right)^2}}.$$

La moyenne efficace de ε est

$$(11)\qquad \mathcal{E} = \frac{I}{2\pi n C}.$$

La relation (9) devient

$$(12)\qquad E = \mathcal{E}\sqrt{4\pi^2 n^2 C^2 R^2 + (4\pi^2 n^2 CL - 1)^2}.$$

La tension efficace entre les armatures du condensateur est donc

$$(13)\qquad \mathcal{E} = \frac{E}{\sqrt{4\pi^2 n^2 C^2 R^2 + (4\pi^2 n^2 CL - 1)^2}}.$$

Digitized by Google

Cette tension peut être supérieure à la tension E aux bornes de la dérivation; c'est ce qui a lieu lorsqu'on a

$$(14) \qquad 4\pi^2 n^2 C^2 R^2 + (4\pi^2 n^2 CL - 1)^2 < 1.$$

Les relations (4) et (8) montrent que la phase du courant i dans la dérivation du condensateur est en retard ou en avance sur celle de la tension e suivant que la quantité

$$\frac{2\pi n L - \frac{1}{2\pi n C}}{R}$$

est positive ou négative. La valeur maximum absolue possible de cet angle est $\frac{\pi}{2}$.

Si l'on a

$$(15) \qquad 2\pi n L - \frac{1}{2\pi n C} = 0,$$

on a également

$$(16) \qquad \operatorname{tang}\varphi = 0, \qquad \varphi = 0$$

et

$$(17) \qquad I = \frac{E}{R},$$

c'est-à-dire que l'impédance du circuit AB est égale à sa résistance ohmique. Le courant I est alors maximum et coïncide en phase avec la tension E aux bornes. On dit alors qu'il y a *résonance*, ou encore que le circuit est *résonant*. L'intensité efficace du courant est la même que celle qui serait produite par une tension continue E agissant sur une résistance R.

Si l'on relie une bobine de self-induction à deux câbles entre lesquels existe une tension alternative sinusoïdale de moyenne E, et si on lui adjoint en série un condensateur de capacité C que l'on fait croître depuis zéro, le courant I, d'abord nul, croît jusqu'à ce que les conditions de résonance soient obtenues et atteint la valeur $I = \frac{E}{R}$. Si alors on con-

Digitized by Google

tinue à augmenter la capacité C, le courant I décroît et tend vers la limite

$$(18) \qquad \frac{E}{\sqrt{R^2 + (2\pi n L)^2}}.$$

Lorsque la résonance est réalisée, la tension aux bornes du condensateur est

$$(19) \qquad \mathcal{E} = E\frac{2\pi n L}{R}.$$

Un condensateur de capacité C peut être considéré comme une résistance égale à $-\frac{1}{2\pi n C}$ mais produisant une avance de phase de 90°, et la réactance d'une bobine de self-induction, comme une résistance $2\pi n L$ retardant le courant de 90°. Les actions de ces deux appareils sont directement opposées.

Nous empruntons à MM. Houston et Kennelly les exemples suivants, en conservant leurs notations. Le symbole j indique que la quantité à laquelle elle sert de préfixe a sa phase en retard de 90° sur celle du courant.

Soit

$$C = 1 \text{ microfarad};$$
$$n = 125 \text{ périodes par seconde};$$
$$E = 1000 \text{ volts}.$$

On a

$$2\pi n = 785,4 \text{ radiants par seconde}.$$

La résistance apparente du condensateur est

$$\frac{1}{785,4 \times 1 \times 10^{-6}} = 1273 \text{ ohms}.$$

Le courant est donc

$$I = \frac{1000}{1273\,\underline{/90^\circ}} = 0,7845\,\underline{/-90^\circ} \text{ ampère}.$$

Montons en série une bobine de self-induction opposant au courant sinusoïdal, d'une fréquence de 125 périodes par seconde, une réactance de $j\,150$ ohms, et un condensateur ayant une résistance apparente $-j\,100$ ohms pour la fré-

Digitized by Google

quence donnée. La réactance résultante est

$$j(150 - 100) = j\,50 \text{ ohms.}$$

Soit encore un condensateur de 7,5 microfarads monté en série avec une bobine de self-induction de 0,66 henry d'inductance et de 100 ohms de résistance. La tension sinusoïdale aux bornes du système est $E = 52$ volts, la fréquence $n = 61$ périodes par seconde. On a

$$2\pi.61 = 383,2 \text{ radiants par seconde.}$$

La réactance de la bobine est

$$j\,0,66.383,2 = j\,252,9 \text{ ohms.}$$

Le condensateur a comme réactance

$$-j\frac{1}{2\pi nC} = -j\frac{1}{383,2.7,5.10^{-6}} = -j\,347,9 \text{ ohms.}$$

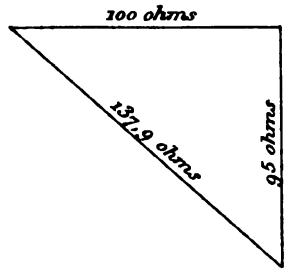
La réactance totale du système est donc

$$j(252,9 - 347,9) = -j\,95 \text{ ohms}$$

et l'impédance totale (*fig.* 88)

$$Z = 100 - j\,95 = 137,9\,\overline{|43^\circ 32'} \text{ ohms.}$$

Fig. 88.



Le courant dans le système est

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{52}{137,9\,\overline{|43^\circ 32'}} = 0,3771\,\overline{|43^\circ 32'} \text{ ampère.}$$

Digitized by Google

L'impédance de la bobine seule est

$$100 + j\,252,9 = 271,9\,\underline{|68^\circ 25'} \text{ ohms}$$

et l'impédance du condensateur seul égale $347,9\,\underline{|90^\circ}$ ohms.

Si la bobine était seule en circuit, le courant serait

$$\frac{52}{271,9\,\underline{|68^\circ 25'}} = 0,1912\,\underline{|68^\circ 25'} \text{ ampère.}$$

Dans le cas du condensateur seul en circuit, le courant serait

$$\frac{52}{347,9\,\underline{|90^\circ}} = 0,1495\,\underline{|90^\circ} \text{ ampère.}$$

Le condensateur et la bobine étant en série, la tension aux bornes du condensateur est

$$\mathcal{E} = I\,\frac{1}{2\pi n C} = 0,3771 \times 347,9 = 131,2 \text{ volts.}$$

Dans le cas de la résonance, on aurait

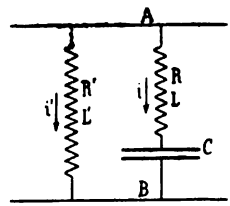
$$\frac{1}{2\pi n C} = 2\pi n L = 252,9 \text{ ohms,}$$

$$I = \frac{E}{R} = \frac{52}{100} = 0,52 \text{ ampère,}$$

$$\mathcal{E} = 131,5 \text{ volts.}$$

Montons entre les fils A, B (*fig.* 89) une seconde dériva-

Fig. 89.



tion de résistance R' et d'inductance L', représentant la seconde section inductrice du moteur. La phase du courant i' dans ce conducteur sera retardée par rapport à celle de e

Digitized by Google

d'un angle φ' défini par la relation

$$\tan\varphi' = \frac{2\pi n L'}{R'} \tag{20}$$

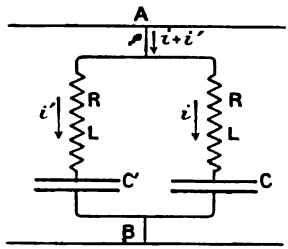
et l'angle de différence de phase des deux courants i et i' sera, φ désignant le retard de phase de i par rapport à e,

$$\psi = \varphi' - \varphi. \tag{21}$$

L'angle φ pouvant varier de $+\frac{\pi}{2}$ à $-\frac{\pi}{2}$; et l'angle φ' de o à $+\frac{\pi}{2}$, on pourra obtenir pour leur différence la valeur $\frac{\pi}{2}$ en choisissant convenablement les constantes R, L, C, R', L'.

Établissons maintenant les deux sections du moteur d'une façon identique (*fig.* 90), et intercalons dans ces enroule-

Fig. 90.



ments deux condensateurs de capacités C et C' telles que la phase de l'un des courants i soit en avance d'un huitième de période, et la phase du courant i' en retard d'un huitième de période sur celle de la tension e. Les différences de phase de e par rapport à i et à i' sont donc définies par les relations

$$\frac{2\pi n L - \frac{1}{2\pi n C}}{R} = -1, \tag{22}$$

$$\frac{2\pi n L - \frac{1}{2\pi n C'}}{R} = +1, \tag{23}$$

Digitized by Google

d'où l'on tire

$$C = \frac{1}{2\pi n(2\pi n L + R)}, \tag{24}$$

$$C' = \frac{1}{2\pi n(2\pi n L - R)}; \tag{25}$$

C' devant être positif, il faut qu'on ait

$$2\pi n L > R. \tag{26}$$

D'après les relations (10), (22) et (23), le courant efficace est le même dans les deux sections et égal à

$$I = \frac{E}{R\sqrt{2}}. \tag{27}$$

Reportons maintenant l'origine des temps à l'instant où la tension e est nulle. Les courants i et i' auront pour expression

$$\left\{\begin{aligned} i &= \frac{E}{R}\sin\left(2\pi nt + \frac{\pi}{4}\right), \\ i' &= \frac{E}{R}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{4}\right). \end{aligned}\right. \tag{28}$$

La puissance de chaque courant est

$$\frac{P}{2} = E\frac{E}{R\sqrt{2}}\cos\frac{\pi}{4} = \frac{E^2}{2R} = EI\frac{\sqrt{2}}{2}. \tag{29}$$

Le courant instantané total est

$$i + i' = \frac{E}{R}\sqrt{2}\sin 2\pi nt. \tag{30}$$

Sa phase coïncide avec celle de la tension e; sa moyenne efficace est

$$J = \frac{E}{R} = I\sqrt{2}. \tag{31}$$

La puissance totale fournie aux bornes du moteur a pour valeur

$$P = EJ = EI\sqrt{2}. \tag{32}$$

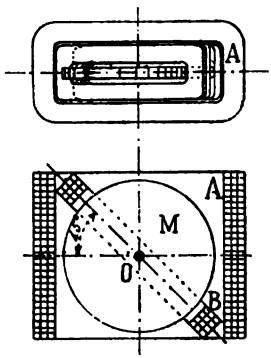
Digitized by Google

Le courant total dans la dérivation AB du moteur, et par suite aussi le courant dans la ligne, coïncident en phase avec la tension. Les deux courants traversant les sections du moteur sont au courant continu de même puissance et de même tension dans le rapport $\sqrt{2} : 1$.

L'application des condensateurs aux moteurs à courant diphasé destinés à fonctionner avec un courant alternatif a été proposée en particulier par MM. Hutin et Leblanc.

Schallenberger produit un champ tournant au moyen d'un courant alternatif simple, à l'aide d'un dispositif spécial (*fig.* 91). Il lance le courant alternatif dans une bobine

Fig. 91.



rectangulaire fixe A, à l'intérieur de laquelle il dispose une seconde bobine B fermée en court-circuit sur elle-même, et dont le plan est incliné à 45° sur celui de la première.

Soient :

I le courant efficace dans la bobine A;

I′ le courant efficace dans la bobine B;

$\mathfrak{R}$ la réluctance du circuit magnétique;

Z le nombre de spires de la bobine A;

Z′ le nombre de spires de la bobine B;

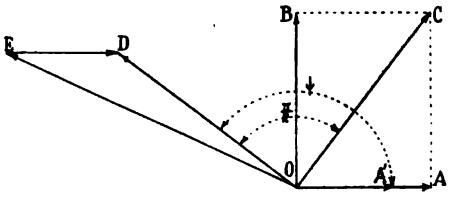
R la résistance de la bobine B.

Digitized by Google

Remplaçons la bobine B par deux bobines, l'une b concentrique à A, et l'autre b' perpendiculaire à A, ayant chacune un nombre de spires $z = \frac{Z'}{\sqrt{2}}$, la résistance totale de ces deux bobines *montées en série* étant égale à R. Appelons L l'inductance de la bobine b'.

Soit dans le diagramme ci-joint (*fig.* 92) $OA = RI'\sqrt{2}$. La

Fig. 92.



force électromotrice maximum engendrée dans la bobine b sera OC, résultante de OA et de $OB = 2\pi nLI'\sqrt{2}$.

Le champ maximum dans les bobines A et b est $\Phi = OD$, résultante de $OE = \frac{4\pi ZI\sqrt{2}}{\mathfrak{R}}$ et de $ED = \frac{4\pi zI'\sqrt{2}}{\mathfrak{R}}$, et en quadrature avec OC. D'autre part, le champ $OA' = \frac{4\pi zI'\sqrt{2}}{\mathfrak{R}}$ dans la bobine b' est suivant OA. L'angle $\psi = DOA'$ de décalage des champs dans les bobines A et b d'une part, et b' d'autre part, dont les plans sont perpendiculaires, est donc toujours supérieur à $\frac{\pi}{2}$, valeur dont il se rapproche d'autant plus que la quantité $\frac{2\pi nL}{R}$ est plus petite. Cet angle ψ est du reste constant quel que soit I'. OD est proportionnel à OC, qui lui-même est proportionnel à I'; donc I est proportionnel à I'. Par suite, les angles EOA et EOC que fait le courant primaire avec le courant secondaire et avec la force contre-électromotrice sont constants. On obtient un champ tournant elliptique.

Schallenberger a appliqué ce principe à son coulombmètre pour courant alternatif. A cet effet, il dispose à l'intérieur des

Digitized by Google

deux bobines un disque de fer M (*fig.* 91) calé sur un axe monté suivant l'intersection O des plans moyens des deux bobines A, B. Cet axe porte un frein et commande une minuterie.

Le disque de fer joue le double rôle de noyau magnétique diminuant la réluctance, et d'induit massif dans lequel le champ tournant engendre des courants de Foucault qui, réagissant sur le champ, donnent naissance au couple moteur.

Un moteur de ce genre comporte donc un circuit inducteur fixe, un circuit induit fixe, et un circuit induit mobile.

MM. Patrouilleau et Mondon ont appliqué le dispositif Schallenberger au réglage de leur lampe à arc à courant alternatif.

Digitized by Google

CHAPITRE III.

CANALISATION DES COURANTS POLYPHASÉS.

CALCUL DES CANALISATIONS A COURANTS POLYPHASÉS.

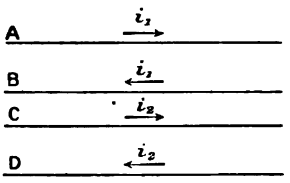
§ I. — Notions élémentaires.

I. — *Canalisations à courant diphasé.*

Un courant diphasé étant constitué par deux courants alternatifs simples dont les phases diffèrent d'un quart de période, peut être canalisé au moyen de deux lignes distinctes à deux fils AB, CD (*fig.* 93).

Supposons que la ligne et les appareils récepteurs n'ont

Fig. 93.



ni inductance ni capacité, et soient : R la résistance commune des quatre conducteurs; E la tension et I le courant efficace à l'origine des deux sections que nous admettons également chargées. La puissance à l'origine est $P = 2EI$.

Le calcul de cette ligne à quatre fils revient évidemment à celui de deux lignes à courant alternatif simple transmettant

Digitized by Google

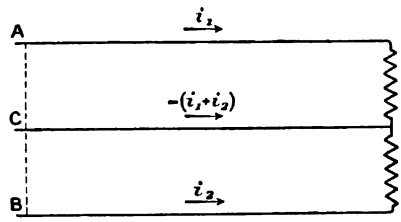
chacune un courant I sous la tension E. La perte de tension est

$$\varepsilon = 2\mathrm{RI}. \tag{1}$$

Une ligne à courant diphasé à quatre conducteurs exige donc, à pertes égales, le même poids de cuivre qu'une ligne à courant alternatif simple transmettant la même puissance sous la même tension.

Pour simplifier la ligne et diminuer le nombre de supports, on peut réunir en un seul deux des conducteurs, B et D par

Fig. 94.



exemple (*fig.* 94). Supposons les deux sections travaillant sur deux résistances simples r égales.

On a, d'après la définition d'un courant diphasé,

$$e_1 = \mathrm{E}\sqrt{2}\sin 2\pi nt, \tag{2}$$

$$e_2 = \mathrm{E}\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right) = -\mathrm{E}\sqrt{2}\cos 2\pi nt. \tag{3}$$

Or

$$e_1 = (\mathrm{R}+r)i_1 + \mathrm{R}'(i_1+i_2), \tag{4}$$

$$e_2 = (\mathrm{R}+r)i_2 + \mathrm{R}'(i_1+i_2); \tag{5}$$

d'où

$$i_1 + i_2 = \frac{2\mathrm{E}}{\mathrm{R}+r+2\mathrm{R}'}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{4}\right). \tag{6}$$

En posant

$$\frac{\mathrm{R}+r+2\mathrm{R}'}{\mathrm{R}+r} = 1 + \frac{2\mathrm{R}'}{\mathrm{R}+r} = \tang\psi, \tag{7}$$

Digitized by Google

il vient

$$(8)\quad i_1 = E\frac{\sqrt{1+\left(\frac{R+r+2R'}{R+r}\right)^2}}{R+r+2R'}\sin\left[2\pi nt+\left(\psi-\frac{\pi}{4}\right)\right],$$

$$(9)\quad i_2 = E\frac{\sqrt{1+\left(\frac{R+r+2R'}{R+r}\right)^2}}{R+r+2R'}\sin\left[2\pi nt-\left(\psi+\frac{\pi}{4}\right)\right].$$

Ces deux dernières relations montrent que les courants i_1 et i_2 n'ont pas la même phase que les tensions e_1 et e_2 au départ de la ligne; i_1 présente sur e_1 une avance de phase $\psi - \frac{\pi}{4}$, et i_2 un retard de phase sur e_2, $\psi - \frac{\pi}{4}$. La différence de phase de i_1 et de i_2 est donc égale à 2ψ.

Comme on a

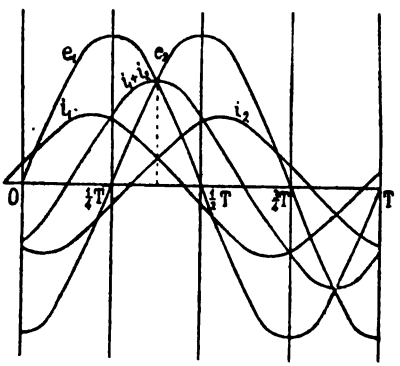
$$\operatorname{tang}\psi = 1 + \frac{2R'}{R+r} > 1,$$

on a

$$\psi > \frac{\pi}{4},\quad 2\psi > \frac{\pi}{2}.$$

Par conséquent, les tensions e_1 et e_2 différant d'un quart de période, i_1 et i_2 diffèrent de plus d'un quart de période.

Fig. 95.



La figure 95 représente les tensions et les courants dans leurs phases relatives.

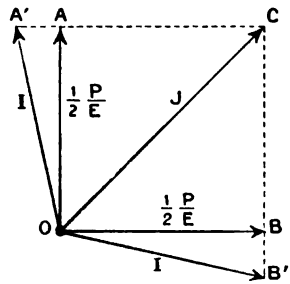
Digitized by Google

La relation (6) montre que le courant $i_1 + i_2$ qui passe dans le conducteur commun est en retard d'un huitième de période sur e_1, et en avance d'un huitième de période sur e_2; il est en retard de ψ sur i_1 et en avance de ψ sur i_2. La moyenne efficace de ce courant est

$$J = \frac{E\sqrt{2}}{R + r + 2R'}. \tag{10}$$

Les relations (8) et (9) montrent encore que les moyennes efficaces des courants i_1 et i_2, par suite de la différence

Fig. 96.



de phase $\psi - \frac{\pi}{4}$, doivent être, pour une puissance donnée, plus grandes que si la ligne était à quatre fils (*fig.* 96).

Dans les conditions de la pratique, l'angle ψ diffère très peu de $\frac{\pi}{4}$. Par exemple, en calculant la ligne pour une perte de 15 pour 100 de la tension à l'origine, et en adoptant pour le conducteur commun une section égale à la section de chaque conducteur distinct multipliée par $\sqrt{2}$, on trouve

$$\operatorname{tang}\psi = \frac{R + r + 2R'}{R + r} = 1,13,$$

$$\psi = 48^\circ 30'; \qquad \cos\psi = 0,998,$$

d'où

$$\psi - \frac{\pi}{4} = 3^\circ 30'.$$

Digitized by Google

Nous pouvons donc admettre que les courants i_1 et i_2 coïncident sensiblement en phase avec les tensions e_1 et e_2, et que les courants efficaces dans le fil commun et dans les fils distincts sont dans le rapport

$$\frac{J}{I} = \sqrt{2}.$$

Considérons une ligne à courant diphasé formée de quatre fils égaux, de résistance R et de section S. Remplaçons ces quatre conducteurs par trois fils dont les sections S′ et S'_1 sont proportionnelles aux courants I et J, et telles que la perte totale de puissance soit la même que dans la première ligne. Nous aurons

$$S'_1 = S'\sqrt{2},$$

$$4RI^2 = 2R'I^2 + 2\frac{R'}{\sqrt{2}}I^2,$$

$$4R = R'\left(2 + \frac{2}{\sqrt{2}}\right),$$

$$\frac{R}{R'} = 0,853,$$

d'où

$$(11) \qquad \begin{cases} S' = 0,853.S, \\ S'_1 = 1,207.S. \end{cases}$$

Les poids de cuivre de la ligne à trois fils et de la ligne à quatre fils sont dans le rapport

$$(12) \qquad \frac{0,853 \times 2 + 1,207}{4} = 0,73 \text{ environ.}$$

Dans ces conditions, la ligne à trois conducteurs réalise donc une économie d'environ 27 pour 100 du poids du cuivre de la ligne à quatre conducteurs.

Considérons encore la ligne à quatre conducteurs égaux, et supprimons l'un de ceux-ci, en utilisant l'un des trois fils restants comme conducteur commun. La perte de puissance sera

$$(13) \qquad 2RI^2 + R(I\sqrt{2})^2 = 4RI^2.$$

Digitized by Google

La perte de puissance restera donc la même, et nous aurons économisé 25 pour 100 du poids de cuivre.

La ligne à courant diphasé à trois conducteurs semble donc être toujours plus économique que la ligne à quatre conducteurs. Mais il faut remarquer que la tension entre les deux fils distincts est alors égale à $E\sqrt{2}$, c'est-à-dire supérieure d'environ 41 pour 100 à la tension de chaque section. C'est cette tension $E\sqrt{2}$ qu'il faut envisager au point de vue des appareils générateurs et récepteurs, et de la ligne.

Si la tension E est faible, 110 volts par exemple, il n'y a pas d'inconvénient, en général, à faire fonctionner les divers appareils à 155 volts. C'est le cas des canalisations secondaires, pour lesquelles ce montage est économique, avantageux.

Si E a une grande valeur, l'isolation des appareils générateurs et récepteurs doit pouvoir résister à la tension $E\sqrt{2}$. Si l'on veut que la tension efficace entre deux fils quelconques ne soit pas supérieure à E, il faut réduire la tension dans chaque section à $\frac{E}{\sqrt{2}}$. En employant trois fils égaux, pour avoir une même perte de puissance, la section des conducteurs devra donc être doublée, et le poids de cuivre de la ligne à trois fils sera 1,5 fois celui de la ligne à quatre fils.

En résumé, pour une puissance et une tension entre deux conducteurs quelconques à l'origine données, et pour une même perte, les courants coïncidant en phase avec leur tension :

1° La ligne à courant diphasé à quatre conducteurs exige le même poids de cuivre qu'une ligne à courant alternatif simple;

2° La ligne à courant diphasé à trois conducteurs exige 50 pour 100 de plus de cuivre que la ligne à courant alternatif simple;

3° Dans le cas où l'on peut admettre entre les conducteurs distincts une tension d'environ 41 pour 100 supérieure à la tension dans chaque section, la ligne à courant diphasé à trois conducteurs économise 25 pour 100 environ du cuivre de la ligne à courant alternatif simple.

Remarque. — Lorsqu'une canalisation alimente des moteurs

Digitized by Google

synchrones à enroulement continu, l'emploi de quatre conducteurs est obligatoire. Il est évident que, si ces moteurs sont reliés à une canalisation secondaire, la canalisation primaire peut être à trois fils.

II. — *Canalisations à courant triphasé.*

Nous avons déjà vu que les trois sections des générateurs et des récepteurs de courant triphasé peuvent être montées de deux manières différentes : *en triangle* et *en étoile*.

Il en résulte qu'on peut envisager quatre groupements principaux :

1° Générateur en triangle et récepteurs en triangle;
2° Générateur en étoile et récepteurs en étoile;
3° Générateur en triangle et récepteurs en étoile;
4° Générateur en étoile et récepteurs en triangle.

Générateur et récepteurs montés en triangle.

Soient (*fig.* 97) :

ABC le générateur, induit de machine ou enroulement secondaire de transformateur, et *abc* les récepteurs;

R la résistance commune des fils de ligne;

r la résistance commune des sections réceptrices supposées égales (ces résistances sont supposées simples);

e_1, e_2, e_3 les tensions instantanées aux bornes des sections génératrices AB, BC, CA.

Les flèches de la figure 97 indiquent le sens positif des tensions et des courants.

Posons

$$(1)\qquad \begin{cases} e_1 = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt, \\ e_2 = E\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right), \\ e_3 = E\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

Digitized by Google

On a identiquement

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0. \tag{2}$$

On a évidemment les relations suivantes :

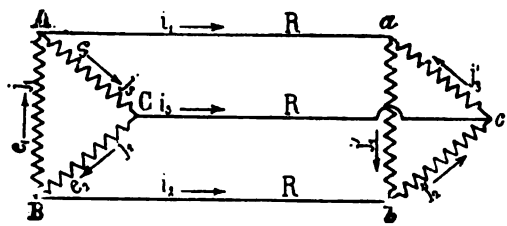
$$\left\{\begin{aligned} i_1 &= -j_3 + j_1 = j'_1 - j'_3, \\ i_2 &= -j_1 + j_2 = j'_2 - j_1, \\ i_3 &= -j_2 + j_3 = j'_3 - j'_2, \end{aligned}\right. \tag{3}$$

d'où

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0. \tag{4}$$

Les forces électromotrices dans les trois sections génératrices ayant leur somme constamment nulle et les trois sec-

Fig. 97.



tions réceptrices étant également chargées, le courant circulaire est nul, et l'on a, par suite,

$$j_1 + j_2 + j_3 = 0. \tag{5}$$

On a en outre

$$\left\{\begin{aligned} e_1 &= R(i_1 - i_2) + rj'_1, \\ e_2 &= R(i_2 - i_3) + rj'_2, \\ e_3 &= R(i_3 - i_1) + rj'_3. \end{aligned}\right. \tag{6}$$

On déduit des relations (2) et (6)

$$j'_1 + j'_2 + j'_3 = 0. \tag{7}$$

On tire des relations (3), (5) et (7)

$$\left\{\begin{aligned} i_1 - i_2 &= 3j_1 = 3j'_1, \\ i_2 - i_3 &= 3j_2 = 3j'_2, \\ i_3 - i_1 &= 3j_3 = 3j'_3 \end{aligned}\right. \tag{8}$$

Digitized by Google

et par suite

$$(9)\qquad \begin{cases} j'_1 = j_1, \\ j'_2 = j_2, \\ j'_3 = j_3. \end{cases}$$

On tire des relations précédentes

$$(10)\qquad \begin{cases} j_1 = j'_1 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R + r} \sin 2\pi nt, \\ j_2 = j'_2 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R + r} \sin\left(2\pi nt - \dfrac{2\pi}{3}\right), \\ j_3 = j'_3 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R + r} \sin\left(2\pi nt - \dfrac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

$$(11)\qquad \begin{cases} i_1 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R + r} \sqrt{3} \sin\left(2\pi nt - \dfrac{\pi}{6}\right), \\ i_2 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R + r} \sqrt{3} \sin\left(2\pi nt - \dfrac{\pi}{6} - \dfrac{2\pi}{3}\right), \\ i_3 = \dfrac{E\sqrt{2}}{3R + r} \sqrt{3} \sin\left(2\pi nt - \dfrac{\pi}{6} - \dfrac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

Les relations (10) montrent que les trois courants dans les sections réceptrices ont même phase et même moyenne que les courants dans les sections génératrices correspondantes. La moyenne efficace de ces six courants est

$$(12)\qquad J = \frac{E}{3R + r}.$$

Ce courant est celui qu'engendrerait une force électromotrice E agissant sur un circuit ayant comme résistance celle d'une section réceptrice plus trois fois la résistance de l'un des fils de la ligne.

On déduit des relations (10) et (11) :

1° Que les trois courants i_1, i_2, i_3 diffèrent entre eux d'un tiers de période;

2° Que i_1 est en retard de $\frac{\pi}{6}$ ou 30° sur j_1; il en est de même de i_2 par rapport à j_2 et de i_3 par rapport à j_3;

3° Que la moyenne efficace I des courants de ligne est à

Digitized by Google

la moyenne efficace J des courants dans les sections génératrices et les sections réceptrices dans le rapport

$$\sqrt{3} : 1 = 1,732,$$

c'est-à-dire qu'on a

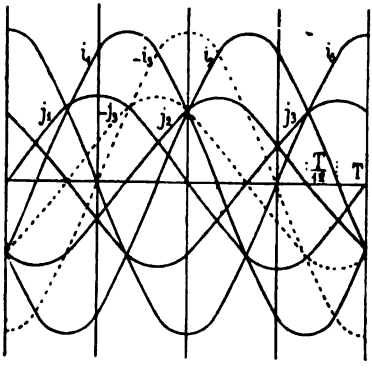
$$I = J\sqrt{3}. \tag{13}$$

Remarque. — On peut mettre l'un des courants de travail, j'_3 par exemple, sous la forme

$$\left\{\begin{aligned} j'_3 &= -\frac{E\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3} + \pi\right) \\ &= -\frac{E\sqrt{2}}{3R+r}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{3}\right). \end{aligned}\right. \tag{14}$$

C'est-à-dire qu'en changeant le sens des courants i_3 et j'_3 les relations (10) et (11) représentent six courants différant

Fig. 98.



deux à deux de 30° ou d'un douzième de période, comme l'indique la figure 98 ci-dessus.

La figure 99 représente le schéma, proposé par la maison Siemens et Halske, d'un inducteur de moteur à courant triphasé muni de douze bobines excitées par six courants différant d'un douzième de période. Les bobines recevant les courants i_1, i_2, i_3 auront une section de fil supérieure à celle des

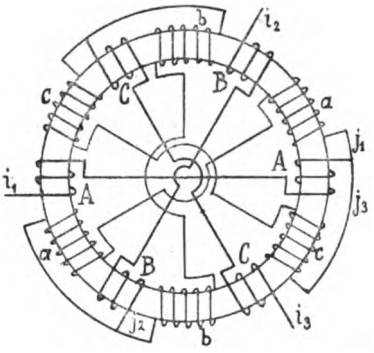
Digitized by Google

fils des six autres bobines dans le rapport $\sqrt{3} : 1$; mais le nombre de spires de ces dernières sera $\sqrt{3}$ fois supérieur au nombre de spires des premières.

Ces douze bobines engendrent dans l'anneau deux pôles magnétiques tournants, de noms contraires.

Le but de ce dispositif était d'obtenir sur l'anneau une exci-

Fig. 99.



tation répartie plus uniformément qu'en n'employant que trois courants. La pratique a montré que ce dispositif est superflu.

Calcul de la ligne. — D'après ce qui précède, en admettant que les circuits ne possèdent ni inductance ni capacité, et en désignant par E la tension aux bornes, à l'origine, J le courant dans une section génératrice ou réceptrice, I le courant à une borne ou dans un fil de ligne, R la résistance de chacun de ces conducteurs, la puissance initiale est

$$P = 3EJ = EI\sqrt{3}. \tag{15}$$

Soit p la perte de puissance consentie dans la ligne; on a

$$p = 3RI^2, \tag{16}$$

d'où

$$R = \frac{p}{3I^2}. \tag{17}$$

Digitized by Google

On a, d'après (12),

$$E = 3RJ + rJ. \tag{18}$$

Or rJ est la tension aux bornes d'une section réceptrice. La différence entre la tension aux bornes d'une section génératrice et celle aux bornes de la section réceptrice correspondante est donc

$$e = 3RJ = RI\sqrt{3}. \tag{19}$$

Cette dernière relation permet de calculer immédiatement la résistance de chaque fil de ligne, la perte de tension e dans la ligne étant donnée.

Remarque. — Soient ρ la résistivité du métal, l la longueur d'un fil de ligne et S sa section; on a

$$R = \frac{\rho l}{S}. \tag{20}$$

Le volume total du métal est $3Sl$.

Si la puissance P était transmise sous forme de courant continu ou de courant alternatif de même tension E, le courant de ligne serait égal à $I\sqrt{3}$. En appelant R′ la résistance de chacun des deux fils de ligne et S′ sa section, on aurait pour des pertes égales dans les deux cas

$$2R'(I\sqrt{3}) = RI\sqrt{3}, \tag{21}$$

$$R' = \frac{R}{2}, \tag{22}$$

d'où

$$S' = 2S. \tag{23}$$

Le volume du cuivre serait dans le second cas

$$2S'l = 4Sl. \tag{24}$$

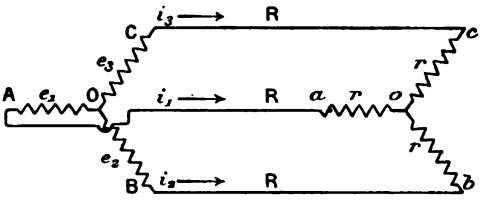
Donc pour une même puissance et une même tension à l'origine, et pour une même perte, la ligne à courant triphasé exige 25 pour 100 de moins de métal que la ligne à courant continu ou alternatif.

Digitized by Google

Générateur et récepteurs montés en étoile.

Soient OABC le générateur, et *oabc* le circuit d'utilisation (*fig.* 100). Appelons E_0 la tension efficace entre le centre

Fig. 100.



de l'étoile et une borne quelconque du générateur (machine ou transformateur), et posons

$$(1)\quad \begin{cases} e_1 = E_0\sqrt{2}\sin 2\pi nt, \\ e_2 = E_0\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \dfrac{2\pi}{3}\right), \\ e_3 = E_0\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \dfrac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

Soient R la résistance de chaque fil de ligne, et r la résistance, supposée simple, de chaque section réceptrice.

Dans ce cas le courant dans un fil de ligne est, à chaque instant, égal à celui qui parcourt les sections génératrice et réceptrice correspondantes.

On a évidemment, en comptant positivement les tensions et les courants dans le sens des flèches,

$$(2)\quad \begin{cases} e_1 - e_2 = Ri_1 + ri_1 - ri_2 - Ri_2 = (R + r)(i_1 - i_2), \\ e_2 - e_3 = (R + r)(i_2 - i_3), \\ e_3 - e_1 = (R + r)(i_3 - i_1). \end{cases}$$

Les trois circuits ayant les points O et *o* communs, on a

$$(3)\qquad i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Cette relation exprime que le courant dans une section est

Digitized by Google

constamment égal et de signe contraire à la somme algébrique des deux autres courants.

On déduit des relations (1), (2) et (3)

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0, \tag{4}$$

$$\begin{cases} e_1 = (R + r) i_1, \\ e_2 = (R + r) i_2, \\ e_3 = (R + r) i_3, \end{cases} \tag{5}$$

d'où

$$\begin{cases} i_1 = \dfrac{E_0\sqrt{2}}{R + r} \sin 2\pi n t, \\ i_2 = \dfrac{E_0\sqrt{2}}{R + r} \sin\left(2\pi n t - \dfrac{2\pi}{3}\right), \\ i_3 = \dfrac{E_0\sqrt{2}}{R + r} \sin\left(2\pi n t - \dfrac{4\pi}{3}\right). \end{cases} \tag{6}$$

Les relations (6) montrent :

1° Que les courants i_1, i_2, i_3 présentent deux à deux une différence de phase d'un tiers de période, et que leurs phases coïncident avec celles des tensions des sections génératrices.

2° Que la moyenne efficace I de chacun de ces courants est

$$I = \frac{E_0}{R + r}. \tag{7}$$

C'est donc le courant qu'engendrerait une force électromotrice constante, ou efficace, E_0 agissant sur un circuit de résistance totale $R + r$. La perte instantanée de tension dans l'un des fils de ligne Aa est Ri_1. La ligne à courant triphasé agit comme trois lignes distinctes conduisant chacune un courant alternatif de moyenne efficace I, et formées chacune d'un fil de résistance R, avec retour de résistance nulle.

3° Que la différence de potentiel entre les centres O et o des étoiles génératrice et réceptrice est constamment nulle [éq. (5)].

Dans le cas du montage en étoile, la ligne à courant triphasé est équivalente à trois lignes à deux fils conduisant trois courants alternatifs différant en phase deux à deux d'un

Digitized by Google

tiers de période, de tension E_0, et dont on réunirait en un seul les trois fils de retour. Dans l'hypothèse que nous avons faite de charges égales sur les trois lignes partielles, ce fil de retour commun serait parcouru par un courant constamment nul; on peut donc le supprimer.

La tension entre deux bornes, A, B par exemple, du générateur a pour expression

$$e_1 - e_2 = E_0\sqrt{2}\sqrt{3}\sin\left(2\pi nt + \frac{\pi}{6}\right).$$

Sa moyenne efficace est

$$E = E_0\sqrt{3}. \tag{8}$$

Calcul de la ligne. — Le courant dans chaque section génératrice coïncidant en phase avec la tension correspondante, la puissance aux bornes du générateur est

$$P = 3E_0I = EI\sqrt{3}. \tag{9}$$

La perte de puissance dans la ligne est

$$p = 3RI^2. \tag{10}$$

On déduit de la relation (7)

$$E_0 = RI + rI. \tag{11}$$

La tension efficace aux bornes de la section *ao* est rI. La tension efficace entre les bornes *a* et *b* des récepteurs est donc

$$rI\sqrt{3}.$$

On tire de (8) et (11)

$$E = RI\sqrt{3} + rI\sqrt{3}. \tag{12}$$

E étant la tension aux bornes A, B du générateur et $rI\sqrt{3}$ la tension aux bornes *a*, *b* des récepteurs, la perte de tension dans la ligne est $RI\sqrt{3}$.

Si la puissance P était transmise sous forme de courant continu ou alternatif de tension E, l'intensité du courant serait $I\sqrt{3}$. Pour une même perte de tension $RI\sqrt{3}$, la résis-

Digitized by Google

tance R′ de chaque fil de ligne serait donnée par la relation

$$2R'I\sqrt{3} = RI\sqrt{3},$$

ou

$$R' = \frac{R}{2}. \tag{13}$$

La section d'un fil de ligne dans ce second cas serait donc double de celle d'un conducteur de la ligne à courant triphasé. Le volume du métal de la ligne à courant triphasé serait, avec celui de la ligne à courant continu ou alternatif, dans le rapport

$$3 : 2 \times 2 = \frac{3}{4}. \tag{14}$$

La ligne à courant triphasé économise donc 25 pour 100 du métal de la ligne à courant alternatif.

L'étude des troisième et quatrième groupements se déduit aisément de ce qui précède. La perte dans une ligne à courant triphasé, pour une puissance donnée aux bornes du générateur, dépend de la valeur de la tension aux bornes de départ de la ligne; elle ne dépend pas du mode de montage des sections génératrices et réceptrices.

III. — *Cas de circuits décalant le courant.*

Nous avons admis, dans ce qui précède, que les conduites et les circuits d'utilisation étaient dépourvus d'inductance et de capacité.

Supposons maintenant que la ligne n'ait ni inductance ni capacité, mais que les circuits récepteurs possèdent une inductance. Le courant se trouvera retardé par rapport à la tension d'un angle φ.

Si nous considérons un courant alternatif de tension E et d'intensité I′, la puissance réelle de ce courant est

$$P = EI' \cos\varphi = EI, \tag{1}$$

I désignant le courant qui correspondrait à la puissance P s'il n'y avait pas de retard de phase.

Digitized by Google

On a donc

$$(2) \qquad I' = \frac{I}{\cos\varphi}.$$

Si R′ est la résistance de chaque fil de ligne, la perte de puissance dans cette ligne sera

$$(3) \qquad p = 2R'I'^2 = 2R'\frac{I^2}{\cos^2\varphi}.$$

Soit 2R la résistance de la ligne qui produirait la perte de puissance p si la phase du courant coïncidait avec celle de la tension. On aurait

$$(4) \qquad p = 2RI^2.$$

Donc

$$(5) \qquad R' = R\cos^2\varphi.$$

Cette dernière relation signifie que, pour calculer une ligne devant produire une perte de puissance p, il suffit de calculer cette ligne comme si le courant coïncidait en phase avec la tension, pour la puissance donnée, puis de multiplier la résistance R trouvée pour chaque conducteur par le carré du cosinus de l'angle de différence de phase.

Exemple. — Soit une ligne transmettant une puissance de 500 kilowatts à une tension de 5000 volts, à l'origine, avec une perte *en puissance* de 10 pour 100. Le retard de phase du courant est défini par

$$\cos\varphi = 0,7.$$

La résistance de la ligne sera

$$2R' = \frac{50000}{100^2}\cos^2\varphi = 5 \times \frac{1}{2}.$$

La section des conducteurs devra donc être deux fois plus grande que si le retard de phase était nul.

Digitized by Google

Ligne à courant triphasé.

Nous avons vu précédemment que la perte de puissance dans la ligne est, s'il n'y a pas de décalage,

$$p = 3RI^2.$$

Si le courant est en retard d'un angle φ par rapport à la tension, le courant dans chaque fil de ligne est

$$I' = \frac{I}{\cos\varphi},$$

et l'on a, pour une même perte p,

$$p = 3R'I'^2 = 3R'\frac{I^2}{\cos^2\varphi},$$

d'où

$$R' = R\cos^2\varphi.$$

Exemple. — Supposons qu'on ait

$$\cos\varphi = 0,7;$$

nous aurons

$$R' = \frac{1}{2}R.$$

La valeur de $\cos\varphi = 0,7$ correspond, en moyenne, au cas d'une ligne desservant seulement des moteurs asynchrones partiellement chargés.

Nous avons vu précédemment qu'une ligne à courant triphasé desservant des appareils sans inductance ni capacité réalise une économie de 25 pour 100 sur une ligne à courant continu, à puissance, tension et perte égales.

Il en résulte que, si le courant est décalé d'un angle φ défini par $\cos\varphi = 0,7$, le poids de cuivre de la ligne à courant triphasé est de 50 pour 100 supérieur à celui d'une ligne à courant continu transmettant la même puissance sous la même tension aux bornes et à perte de puissance égale.

On déduit de ce qui précède les deux règles pratiques suivantes :

Digitized by Google

1° Pour calculer une ligne à courant triphasé donnant lieu à une perte de puissance donnée, et alimentant des appareils ne décalant pas le courant, tels que des lampes à incandescence, il suffit de calculer une ligne à courant continu de même longueur, transmettant la puissance considérée sous la même tension aux bornes et avec la même perte; on trouve ainsi deux conducteurs ayant chacun une section S. La ligne à courant triphasé se composera de trois conducteurs de section $\frac{S}{2}$.

Si la ligne dessert uniquement des moteurs d'induction produisant un retard de phase du courant défini par $\cos\varphi = 0,7$, la ligne à courant triphasé se composera de trois conducteurs de section S.

§ II. — Étude complémentaire.

Ligne à courant triphasé desservant des lampes.

Nous avons admis jusqu'ici que les récepteurs chargeaient également les trois sections de la ligne. Cette répartition n'existe pas, en général, lorsque la ligne dessert des lampes.

Considérons une ligne aux bornes de laquelle on maintient trois tensions e_1, e_2, e_3 de même moyenne efficace E, et différant en phase d'un tiers de période :

$$(1)\qquad \begin{cases} e_1 = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt, \\ e_2 = E\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right), \\ e_3 = E\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right), \\ e_1 + e_2 + e_3 = 0. \end{cases}$$

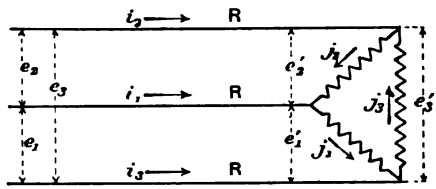
Cette ligne alimente, à son extrémité, des lampes réparties d'une façon quelconque entre les trois sections, et ne décalant pas le courant.

Digitized by Google

Montage des lampes en triangle.

Soient R la résistance de chacun des conducteurs de la ligne, r_1, r_2 et r_3 les résistances des trois sections réceptrices,

Fig. 101.



les tensions aux bornes de ces dernières étant e'_1, e'_2, e'_3 (*fig.* 101). On a

$$(2)\qquad \begin{cases} i_1 = j_1 - j_2, \\ i_2 = j_2 - j_3, \\ i_3 = j_3 - j_1, \end{cases}$$

d'où

$$(3)\qquad i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

La somme algébrique des courants dans les trois fils de ligne est donc constamment nulle.

On tire de (2)

$$(4)\qquad \begin{cases} i_1 - i_2 = j_1 - 2j_2 + j_3, \\ i_2 - i_3 = j_2 - 2j_3 + j_1, \\ i_3 - i_1 = j_3 - 2j_1 + j_2. \end{cases}$$

On a d'autre part

$$(5)\qquad \begin{cases} e_1 = e'_1 + R(i_1 - i_3), \\ e_2 = e'_2 + R(i_2 - i_1), \\ e_3 = e'_3 + R(i_3 - i_2) \end{cases}$$

Digitized by Google

et

$$(6)\qquad \begin{cases} e'_1 = r_1 j_1, \\ e'_2 = r_2 j_2, \\ e'_3 = r_3 j_3. \end{cases}$$

On tire de (5)

$$(7)\qquad e'_1 + e'_2 + e'_3 = 0.$$

On déduit des relations (4), (5), (6) et (7)

$$(8)\qquad \begin{cases} e'_1 = e_1 - R(2j_1 - j_2 - j_3), \\ e'_2 = e_2 - R(2j_2 - j_3 - j_1), \\ e'_3 = e_3 - R(2j_3 - j_1 - j_2); \end{cases}$$

$$(9)\qquad \begin{cases} e_1 - e_2 = \dfrac{3R + r_1}{r_1} e'_1 - \dfrac{3R + r_2}{r_2} e'_2, \\ e_2 - e_3 = \dfrac{3R + r_3}{r_3} e'_1 + \dfrac{3Rr_2 + 3Rr_3 + 2r_2r_3}{r_2r_3} e'_2, \\ e'_3 = -(e'_1 + e'_2). \end{cases}$$

Posons, pour simplifier l'écriture,

$$(10)\qquad \begin{cases} \dfrac{3R + r_1}{r_1} = a; \quad \dfrac{3R + r_2}{r_2} = b; \quad \dfrac{3R + r_3}{r_3} = c, \\ \dfrac{3Rr_1 + 3Rr_2 + 2r_1r_2}{r_1r_2} = m, \\ \dfrac{3Rr_2 + 3Rr_3 + 2r_2r_3}{r_2r_3} = n, \\ \dfrac{3Rr_3 + 3Rr_1 + 2r_3r_1}{r_3r_1} = p. \end{cases}$$

Il vient

$$(11)\qquad \begin{cases} e'_1 = \dfrac{(e_1 - e_2)n + (e_2 - e_3)b}{an + bc}, \\ e'_2 = \dfrac{(e_2 - e_3)p + (e_3 - e_1)c}{bp + ac}, \\ e'_3 = \dfrac{(e_3 - e_1)m + (e_1 - e_2)a}{cm + ab}. \end{cases}$$

Digitized by Google

Remplaçons e_1, e_2, e_3 par leurs valeurs données par les relations (1) et posons

$$(12)\quad \left\{\begin{aligned} &\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}(2b-n)}{\frac{3}{2}n} = \operatorname{tang}\psi_1,\\ &\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}(2c-p)}{\frac{3}{2}p} = \operatorname{tang}\psi_2,\\ &\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}(2a-m)}{\frac{3}{2}m} = \operatorname{tang}\psi_3. \end{aligned}\right.$$

Les relations (11) deviennent

$$(13)\quad \left\{\begin{aligned} e'_1 &= \frac{E\sqrt{2}}{an+bc}\sqrt{\left(\frac{3}{2}n\right)^2+\left[\frac{\sqrt{3}}{2}(2b-n)\right]^2}\sin(2\pi nt-\psi_1),\\ e'_2 &= \frac{E\sqrt{2}}{bp+an}\sqrt{\left(\frac{3}{2}p\right)^2+\left[\frac{\sqrt{3}}{2}(2c-p)\right]^2}\sin\left(2\pi nt-\frac{2\pi}{3}-\psi_2\right),\\ e'_3 &= \frac{E\sqrt{2}}{cm+ab}\sqrt{\left(\frac{3}{2}m\right)^2+\left[\frac{\sqrt{3}}{2}(2a-m)\right]^2}\sin\left(2\pi nt-\frac{4\pi}{3}-\psi_3\right). \end{aligned}\right.$$

On déduit directement de ces dernières relations les moyennes efficaces E'_1, E'_2, E'_3 des tensions à l'extrémité de la ligne.

On vérifie aisément que, si les trois résistances r_1, r_2, r_3 sont égales, $r_1 = r_2 = r_3 = r$, on a

$$E'_1 = E'_2 = E'_3 = E\frac{r}{3R+r}.$$

Exemple. — Soit une ligne à courant triphasé établie pour transporter une puissance initiale de 100 kilowatts sous 5000 volts, desservant des lampes à incandescence réparties également entre les trois sections. La perte de tension consentie dans la ligne est de 10 pour 100, soit 500 volts. La

Digitized by Google

résistance R d'un fil de ligne est

$$R = \frac{500}{\frac{100000}{5000\sqrt{3}}\sqrt{3}} = \frac{500^{\text{volts}}}{20^{\text{amp}}} = 25^{\text{ohms}}.$$

La résistance r de l'une des sections réceptrices est

$$r = \frac{4500^{\text{volts}}}{\frac{1}{3}\ 20^{\text{amp}}} = 675^{\text{ohms}}.$$

Laissons maintenant les résistances r_1 et r_2 égales à r, et coupons les récepteurs de la troisième section; nous aurons

$$r_1 = r_2 = 675^{\text{ohms}},$$
$$r_3 = \infty.$$

Les coefficients a, b, c, m, n, p deviennent

$$a = 1,11, \qquad m = 2,22,$$
$$b = 1,11, \qquad n = 2,11,$$
$$c = 1,00, \qquad p = 2,11.$$

Par suite,

$$E'_1 = 4594^{\text{volts}},$$
$$E'_2 = 4594^{\text{volts}},$$
$$E'_3 = 4826^{\text{volts}}.$$

Si l'on réglait la tension à l'extrémité de la section I, par exemple, on aurait

$$E'_1 = E'_2 = 4500^{\text{volts}},$$
$$E'_3 = 4727^{\text{volts}}.$$

Il y aurait donc dans la section III une élévation de tension d'environ 5 pour 100 au-dessus de la tension normale.

Éteignons encore les lampes de la section II; nous avons

$$r_1 = 675^{\text{ohms}}, \qquad r_2 = r_3 = \infty$$

et, par suite,

$$E'_1 = 4658^{\text{volts}},$$
$$E'_2 = 4906^{\text{volts}},$$
$$E'_3 = 4906^{\text{volts}}.$$

Digitized by Google

Si l'on maintenait à 4500 volts la tension à l'extrémité de la section I, on aurait

$$E'_1 = 4500^{\text{volts}},$$
$$E'_2 = E'_3 = 4738^{\text{volts}},$$

soit une élévation d'environ 5,3 pour 100 de la tension dans les sections II et III.

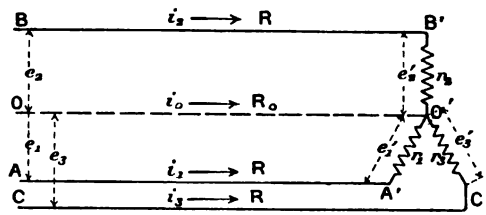
Montage des lampes en étoile.

Relions les centres des étoiles génératrice et réceptrice par un conducteur de résistance R_0, et soit

$$u = R_0 i_0$$

la tension instantanée entre O et O', i_0 étant le courant instantané dans le fil OO' (*fig.* 102).

Fig. 102.



On a évidemment

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_0 = 0, \tag{14}$$

$$\begin{cases} e'_1 = r_1 i_1, \\ e'_2 = r_2 i_2, \\ e'_3 = r_3 i_3. \end{cases} \tag{15}$$

Les trois circuits AA'O'O, BB'O'O, CC'O'O donnent

$$\begin{cases} e_1 - R i_1 - e'_1 + R_0 i_0 = 0, \\ e_2 - R i_2 - e'_2 + R_0 i_0 = 0, \\ e_3 - R i_3 - e'_3 + R_0 i_0 = 0 \end{cases} \tag{16}$$

Digitized by Google

et, par suite,

$$(17)\qquad e'_1 + e'_2 + e'_3 = \left(3 + \frac{R}{R_0}\right) u.$$

On tire des relations (15) et (16)

$$(18)\qquad \begin{cases} e'_1 = (e_1 + u)\dfrac{r_1}{R + r_1}, \\ e'_2 = (e_2 + u)\dfrac{r_2}{R + r_2}, \\ e'_3 = (e_3 + u)\dfrac{r_3}{R + r_3}, \end{cases}$$

d'où

$$(19)\qquad \begin{cases} e'_1 + e'_2 + e'_3 = e_1 \dfrac{r_1}{R + r_1} + e_2 \dfrac{r_2}{R + r_2} + e_3 \dfrac{r_3}{R + r_3} \\ \qquad\qquad + u\left(\dfrac{r_1}{R + r_1} + \dfrac{r_2}{R + r_2} + \dfrac{r_3}{R + r_3}\right). \end{cases}$$

Les relations (17) et (19) donnent

$$(20)\qquad u = \frac{e_1 \dfrac{r_1}{R + r_1} + e_2 \dfrac{r_2}{R + r_2} + e_3 \dfrac{r_3}{R + r_3}}{3 + \dfrac{R}{R_0} - \dfrac{r_1}{R + r_1} - \dfrac{r_2}{R + r_2} - \dfrac{r_3}{R + r_3}},$$

relation qui détermine u.

Remplaçons dans (20) e_1, e_2, e_3 par leurs valeurs données par les relations (1), et posons

$$(21)\qquad \frac{r_1}{R + r_1} - \frac{1}{2}\frac{r_2}{R + r_2} - \frac{1}{2}\frac{r_3}{R + r_3} = A,$$

$$(22)\qquad \frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{r_2}{R + r_2} - \frac{r_3}{R + r_3}\right) = B,$$

$$(23)\qquad 3 + \frac{R}{R_0} - \frac{r_1}{R + r_1} - \frac{r_2}{R + r_2} - \frac{r_3}{R + r_3} = C,$$

$$(24)\qquad \frac{B}{A} = \operatorname{tang}\chi.$$

Digitized by Google

La relation (20) prend la forme

$$(25) \qquad u = E\sqrt{2}\,\frac{\sqrt{A^2+B^2}}{C}\sin(2\pi nt - \chi).$$

La moyenne efficace de la perte de tension dans le fil commun est

$$(26) \qquad U = E\,\frac{\sqrt{A^2+B^2}}{C},$$

et l'intensité efficace dans ce conducteur,

$$(27) \qquad I_0 = \frac{E}{R_0}\,\frac{\sqrt{A^2+B^2}}{C}.$$

Les relations (18) et (25) déterminent les tensions aux bornes des circuits récepteurs.

Supprimons le conducteur commun, c'est-à-dire posons

$$R_0 = \infty;$$

il vient

$$C = 3 - \frac{r_1}{R+r_1} - \frac{r_2}{R+r_2} - \frac{r_3}{R+r_3}.$$

Si nous coupons alors deux des circuits récepteurs, en posant par exemple

$$r_2 = r_3 = \infty,$$

nous interrompons évidemment le troisième.

Coupons maintenant une seule section réceptrice; soit

$$r_3 = \infty,$$

et faisons

$$r_1 = r_2 = r;$$

il vient

$$u = \frac{1}{2}\,e_3$$

et, par suite,

$$e'_1 = \left(e_1 + \frac{1}{2}\,e_3\right)\frac{r}{R+r},$$

$$e'_2 = \left(e_2 + \frac{1}{2}\,e_3\right)\frac{r}{R+r},$$

$$e'_3 = \frac{3}{2}\,e_3$$

Digitized by Google

ou

$$e'_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} E\sqrt{2} \frac{r}{R+r} \sin\left(2\pi nt + \frac{\pi}{6}\right),$$

$$e'_2 = -e'_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} E\sqrt{2} \frac{r}{R+r} \sin\left(2\pi nt - \frac{5\pi}{6}\right),$$

$$e'_3 = 1,5 E\sqrt{2} \sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Les moyennes efficaces de e'_1, e'_2, e'_3 sont donc

$$E'_1 = 0,866 E \frac{r}{R+r},$$

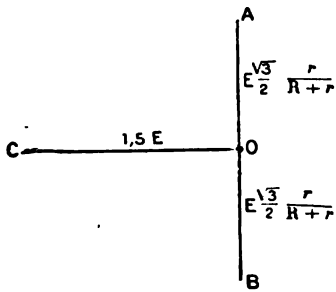
$$E'_2 = 0,866 E \frac{r}{R+r},$$

$$E'_3 = 1,5 . E.$$

La figure 103 représente les tensions $E'_1 = OA$, $E'_2 = OB$, $E'_3 = OC$ dans l'hypothèse $R_0 = \infty$.

Avec le montage ouvert, sans quatrième fil, des charges

Fig. 103.



différentes dans les trois sections peuvent donc donner lieu à des différences considérables entre les tensions aux bornes des sections réceptrices.

Ce dispositif ne doit par suite s'appliquer que dans le cas où les récepteurs chargent également les trois sections : c'est le cas des moteurs.

Si les charges peuvent être différentes dans les trois sections, comme dans le cas de l'éclairage, on adoptera le montage en triangle, ou le montage en étoile *avec quatrième fil* formant équilibreur.

Digitized by Google

§ III. — Chute de tension dans les canalisations.

I. — *Ligne à courant alternatif.*

Considérons [1] d'abord une ligne conduisant un courant alternatif, l'ensemble du circuit compris entre les bornes de départ ne possédant ni inductance ni capacité, et appelons :

P la puissance à l'origine;
e la tension à l'instant t, à l'origine;
E la tension efficace à l'origine;
E_1 la tension efficace à l'extrémité de la ligne;
i le courant à l'instant t;
I le courant efficace;
R la résistance de chacun des conducteurs;
n la fréquence;
K la perte relative de puissance dans la ligne.

Soit

$$e = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt. \tag{1}$$

Puisqu'il n'y a ni inductance ni capacité, la phase du courant i coïncide avec celle de la tension e. Il en est de même de celle de la perte de tension, et par suite de la tension à l'extrémité de la ligne. La moyenne efficace de celle-ci est donc

$$E_1 = E - 2RI. \tag{2}$$

On a d'autre part

$$I = \frac{P}{E}. \tag{3}$$

La perte de puissance dans la ligne est

$$2RI^2 = KEI,$$

d'où

$$2RI = KE. \tag{4}$$

---

[1] Rodet, *Chute de tension dans une ligne* (*Industrie électrique*, n° 86, 25 juillet 1895, p. 305).

Digitized by Google

Cette dernière relation montre que la perte pour 100 en volts est égale à la perte pour 100 en watts.

Considérons maintenant le cas où la ligne à courant alternatif alimente, à son extrémité, des appareils possédant une certaine inductance. La phase du courant se trouve alors retardée d'un angle φ par rapport à celle de la tension à l'origine.

En appelant I′ le courant efficace correspondant à la puissance P, on a les relations connues

$$EI' \cos\varphi = EI,$$

$$I' = \frac{I}{\cos\varphi}, \tag{5}$$

I désignant le courant efficace sans retard de phase.

Si nous conservons à la ligne la même résistance 2R que précédemment, la perte de puissance devient

$$2RI'^2 = \frac{2RI^2}{\cos^2\varphi}. \tag{6}$$

Si nous voulons au contraire que la perte de puissance dans la ligne soit la même que dans le premier cas, il faut prendre une nouvelle résistance 2R′ telle qu'on ait

$$\frac{2R'I^2}{\cos^2\varphi} = 2RI^2,$$

c'est-à-dire

$$2R' = 2R\cos^2\varphi. \tag{7}$$

Le retard de phase du courant par rapport à la tension a donc comme effet d'accroître la perte en watts dans une ligne donnée, pour une puissance et une tension à l'origine données, dans le rapport $1 : \cos^2\varphi$. Pour une même perte de puissance, *la section des conducteurs doit être inversement proportionnelle au carré du cosinus de l'angle de retard de phase.*

Dans le cas particulier où l'on a

$$\varphi = \frac{\pi}{4}; \qquad \cos\varphi = 0,7,$$

Digitized by Google

il vient

$$2R' = \frac{1}{2}(2R),$$

c'est-à-dire que, si la puissance P à l'origine est transmise à la même tension E, avec la même perte relative de puissance K, et avec un retard de phase du courant d'un huitième de période par rapport à la tension, le courant est de 41 pour 100 supérieur au courant sans retard de phase, et la section de la ligne doit être doublée.

Appelons encore e et i la tension et le courant à l'origine, à l'instant t; on a

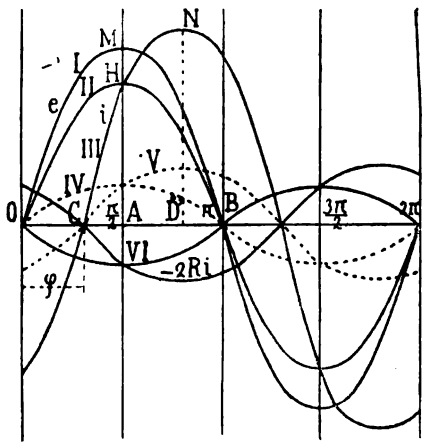
$$e = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt,$$

$$I = \frac{P}{E},$$

$$(8) \qquad i = \frac{I}{\cos\varphi}\sqrt{2}\sin(2\pi nt - \varphi).$$

La courbe I de la figure 104 représente la tension e à l'ori-

Fig. 104.



gine de la ligne. La coubre II représente le courant qui existerait si la puissance P était transmise sans retard de

Digitized by Google

phase du courant; son maximum est

$$AH = I\sqrt{2}.$$

La courbe III indique le courant réel, en retard, sur la tension à l'origine, de l'angle

$$OC = \varphi.$$

On a

$$CA = \frac{\pi}{2} - \varphi.$$

d'où

$$AH = DN \sin CA = DN \cos\varphi.$$

Or

$$DN = \frac{I\sqrt{2}}{\cos\varphi}.$$

Donc

$$(9) \qquad AH = I\sqrt{2}.$$

Cette dernière relation exprime que, pour une puissance et une tension sinusoïdale données à l'origine de la ligne, *l'intensité du courant à l'instant où la tension à l'origine passe par son maximum est indépendante de la valeur de l'angle de différence de phase, et précisément égale au maximum* $I\sqrt{2}$ *qu'aurait le courant si sa phase coïncidait avec celle de la tension à l'origine.*

Toutes les sinusoïdes représentant les courants correspondant à la puissance P et à la tension E, que l'on obtiendrait en faisant varier φ, passeraient donc par le point H.

La perte instantanée de tension dans la ligne à l'instant où e passe par son maximum $E\sqrt{2}$ est

$$2Ri = 2RI\sqrt{2},$$

c'est-à-dire qu'elle est précisément égale à la perte maximum de tension qui se produirait au même instant, si la puissance P était transmise sans retard de phase du courant. Cette valeur instantanée de la perte de tension est donc elle-même constante et indépendante de l'angle φ.

Digitized by Google

La tension à l'extrémité de la ligne, à l'instant t, est

$$(10)\quad \begin{cases} e_1 = e - 2Ri = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt \\ \qquad - 2R\dfrac{I\sqrt{2}}{\cos\varphi}\sin(2\pi nt - \varphi) \\ = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt \\ \qquad - 2RI\sqrt{2}\sin 2\pi nt + 2RI\sqrt{2}\operatorname{tang}\varphi\cos 2\pi nt. \end{cases}$$

Cette dernière relation montre que la tension à l'extrémité de la ligne est la résultante de trois ondes, savoir :

1° L'onde de la tension à l'origine $e = E\sqrt{2}\sin 2\pi nt$;

2° Une onde $-2RI\sqrt{2}\sin 2\pi nt$, qui n'est autre que celle de la perte de tension qui se produirait si la puissance P était transmise sans retard de phase du courant. La phase de cette onde diffère de celle de la première d'une demi-période.

Les valeurs absolues des ordonnées correspondantes de ces deux ondes sont entre elles dans un rapport constant. Leur résultante représente à chaque instant la tension qui existerait à l'extrémité de la ligne si le circuit ne possédait aucune inductance.

3° Une onde $2RI\sqrt{2}\operatorname{tang}\varphi\cos 2\pi nt$, dont la valeur maximum est égale au maximum de la précédente multiplié par la tangente de l'angle de retard de phase, et dont la phase est en avance d'un quart de période sur celle de la tension à l'origine, ou encore sur celle de la résultante des deux premières ondes.

Représentons les moyennes efficaces de ces trois ondes dans leurs phases relatives, et soient (*fig.* 105)

$$OA = E,$$
$$OB = 2RI,$$

cette dernière ayant même direction que OA, mais étant portée en sens contraire;

$$OC = 2RI\operatorname{tang}\varphi,$$

en avance d'un quart de période sur OA.

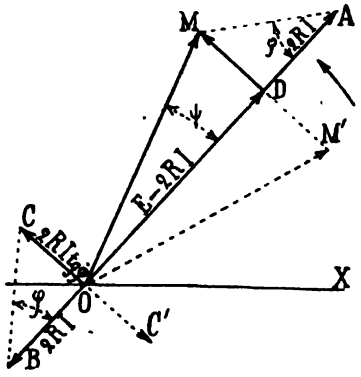
Digitized by Google

Portons sur OA, à partir de A, AD = OB. On a

$$OD = E - 2RI.$$

Menons DM parallèle et égal à OC, et joignons O et M.

Fig. 105.



OM est évidemment la tension efficace à l'extrémité de la ligne.

Remarque. — C'est pour obtenir une solution plus directe du problème que nous avons porté sur la figure 105 les moyennes efficaces des quantités considérées, au lieu de leurs maxima, comme on le fait d'ordinaire dans les diagrammes. Le même tracé représente évidemment ces maxima à une échelle $\frac{1}{\sqrt{2}}$ inférieure à celle adoptée.

Le diagramme précédent montre :

1° *Que la tension efficace* OM *à l'extrémité de la ligne est supérieure à celle qui existerait si la puissance* P *à l'origine était transmise sans retard de phase du courant, quoique l'intensité efficace* $\frac{I}{\cos\varphi}$ *soit plus grande dans le cas considéré que dans l'autre cas;*

2° Que la phase de la tension à l'extrémité de la ligne est

Digitized by Google

en avance sur celle de la tension à l'origine d'un angle ψ défini par

$$\text{(11)} \qquad \operatorname{tang}\psi = \frac{2\,\mathrm{RI}\operatorname{tang}\varphi}{\mathrm{E} - 2\,\mathrm{RI}}.$$

Ce phénomène tend donc à réduire la différence de phase.

Remarque I. — Si nous connections un voltmètre à courant alternatif aux deux bouts d'un fil de ligne, cet appareil indiquerait, dans le cas considéré, une différence de potentiel $\frac{\mathrm{RI}}{\cos\varphi}$, et, dans le cas de la transmission sans retard de phase du courant, une différence de potentiel RI, *inférieure à la première*. La *perte apparente* de tension $\frac{2\,\mathrm{RI}}{\cos\varphi}$ croît avec l'angle de différence de phase φ; nous venons de voir que cette quantité ne représente pas la perte réelle de tension dans la ligne, laquelle décroît, au contraire, en sens inverse de φ.

Remarque II. — Si les récepteurs possédaient de la capacité au lieu d'inductance, la phase du courant serait *en avance* sur celle de la tension e. Dans la première relation (10), l'angle φ serait précédé du signe +, et le dernier terme de la seconde relation (10), du signe —; on aurait alors

$$e_1 = \mathrm{E}\sqrt{2}\sin 2\pi nt - 2\,\mathrm{RI}\sqrt{2}\sin 2\pi nt - 2\,\mathrm{RI}\sqrt{2}\operatorname{tang}\varphi\cos 2\pi nt.$$

Les vecteurs OC, DM de la figure 105 seraient remplacés par les lignes symétriques OC′, DM′. La tension efficace E_1 à l'extrémité de la ligne serait encore augmentée dans le même rapport, pour des réactances égales dans les deux cas, mais la phase de la tension à l'extrémité de la ligne serait *en retard* de l'angle ψ sur celle de la tension à l'origine.

D'après la figure 105, la tension efficace E_1 à l'extrémité de la ligne est

$$\text{(12)} \qquad \mathrm{E}_1 = \mathrm{OM} = \sqrt{(\mathrm{E} - 2\,\mathrm{RI})^2 + (2\,\mathrm{RI}\operatorname{tang}\varphi)^2}.$$

La perte de puissance dans la ligne étant une fraction K

Digitized by Google

de la puissance à l'origine, on a

$$2R\frac{I^2}{\cos^2\varphi} = KEI,$$

d'où

$$(13)\qquad \frac{2RI}{E} = K\cos^2\varphi.$$

Nous avons inscrit dans le Tableau ci-contre une série de résultats obtenus pour différentes valeurs de l'angle de différence de phase et pour différents rendements de la ligne en puissance, la tension E à l'origine étant supposée la même dans tous les cas.

La colonne 5 renferme la perte de tension a en pour 100, calculée sans décalage; la colonne 6 indique la tension à l'extrémité de la ligne en pour 100 de la tension à l'origine, dans la même hypothèse.

La colonne 7 indique la tension réelle à l'extrémité de la ligne en pour 100 de la tension à l'origine, en tenant compte du décalage, calculée d'après la formule (12).

La colonne 8 donne les pertes réelles b en pour 100 de la tension E, c'est-à-dire les différences entre le nombre 100 et les nombres de la colonne 7.

Enfin, la dernière colonne (9) indique la différence $a - b$ des deux pertes relatives calculées d'après les deux méthodes, c'est-à-dire l'erreur, en pour 100 de la tension E à l'origine, que l'on commet si l'on prend pour la perte de tension dans la ligne les nombres a de la colonne 5, au lieu des nombres b de la colonne 8.

Les différences $a - b$ sont toutes positives; la perte réelle de tension est inférieure à la perte calculée sans tenir compte de la différence de phase du courant et de la tension, mais ces nombres diffèrent très peu.

De plus, pour un angle de différence de phase φ déterminé, la différence $a - b$ entre la perte approchée $2RI$ et la perte réelle de tension diminue avec la perte de puissance dans la ligne. En effet, soit

$$\frac{2RI^2}{\cos^2\varphi} = KP$$

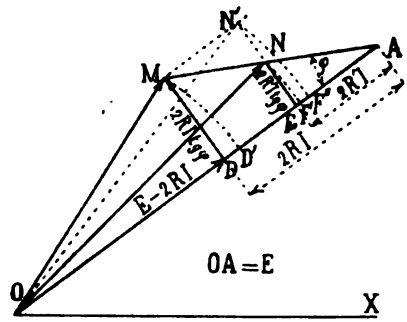
Digitized by Google

$\cos\varphi$.	$\cos^2\varphi$.	$\tang\varphi$.	PERTE de puissance pour 100 dans la ligne 100 K.	$100\,\frac{2RI}{E} = a$.	$100\,\frac{E-2RI}{E}$.	$100\,\frac{\sqrt{(E-2RI)^2+(2RI\tang\varphi)^2}}{E} = 100\,\frac{E_1}{E}$.	PERTE exacte de tension pour 100 $b = 100\left(1-\frac{E_1}{E}\right)$.	DIFFÉRENCE $a-b$.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,9	0,81	0,484	5	4,05	95,95	96	4	»
			10	8,1	91,9	92	8	0,1
			20	16,2	83,8	84,2	15,8	0,4
			30	24,3	75,7	76,6	23,4	0,9
0,8	0,64	0,75	5	3,2	96,8	96,8	3,2	»
			10	6,4	93,6	93,7	6,3	0,1
			20	12,8	87,2	87,8	12,2	0,6
			30	19,2	80,8	82,7	17,3	1,9
0,7	0,5	1,0	5	2,5	97,5	97,5	2,5	»
			10	5,0	95,0	95,1	4,9	0,1
			20	10,0	90,0	90,5	9,5	0,5
			30	15,0	85,0	86,3	13,7	1,3
0,6	0,36	1,327	5	1,8	98,2	98,2	1,8	»
			10	3,6	96,4	96,5	3,5	0,1
			20	7,2	92,8	93,3	6,7	0,5
			30	10,8	89,2	90,3	9,7	1,1
0,5	0,25	1,732	5	1,25	98,75	98,77	1,23	»
			10	2,5	97,5	97,6	2,4	0,1
			20	5,0	95,0	95,4	4,6	0,4
			30	7,5	92,5	93,4	6,6	0,9

Digitized by Google

la perte de puissance dans la ligne, correspondant à une puissance initiale P. La perte approchée de tension est 2RI, et la tension réelle à l'extrémité de la ligne est OM (*fig.* 106).

Fig. 106.



Décrivons avec OM comme rayon un arc de cercle MD'; DD' représente la différence OM — OD de la tension exacte et de la tension approchée à l'extrémité de la ligne, ou encore la différence entre la perte approchée et la perte exacte.

Laissons la puissance initiale P et l'angle φ constants, et réduisons la perte de puissance dans la ligne en donnant à chaque conducteur une nouvelle résistance $R' < R$; nous aurons

$$\frac{2R'I^2}{\cos^2\varphi} < \frac{2RI^2}{\cos^2\varphi},$$

$$2R'I < 2RI,$$

$$E - 2R'I > E - 2RI.$$

Comme le montre la figure 106, il suffit, pour obtenir la nouvelle tension à l'extrémité de la ligne, de porter, sur AO, $AF = 2R'I$, et de mener FN perpendiculaire à OA jusqu'à sa rencontre avec MA; la tension cherchée est évidemment ON.

Menons MN' parallèle à OA, et soit N' le point de rencontre de cette droite et de FN prolongé. Avec ON et ON' comme rayons, décrivons deux arcs de cercles NF' et N'F''. FF' représente la différence entre la tension réelle et la tension approchée, à l'extrémité de la ligne, dans le second cas. Si nous

Digitized by Google

considérons les cordes MD′ et N′F″, nous avons

$$\text{angle } OF''N' > \text{angle } OD'M.$$

Par suite,

$$FF'' < DD'$$

et, *a fortiori*,

$$FF' < DD'.$$

De ce qui précède, nous pouvons donc tirer les conclusions suivantes :

1° *La perte de tension dans une ligne conduisant un courant alternatif est pratiquement indépendante de l'angle de différence de phase du courant par rapport à la tension à l'origine; elle est égale à la perte de tension que produirait la ligne si la puissance considérée était transmise sous forme de courant continu de même tension, c'est-à-dire qu'elle est égale au produit* $2RI$ *de la résistance de la ligne par le quotient* $\frac{P}{E} = I$ *de la puissance par la tension, à l'origine.*

2° *La perte relative de tension dans la ligne est pratiquement égale au produit de la perte relative de puissance par le carré du facteur de puissance* $\cos\varphi$ [relation (13)].

Remarque. — Dans le cas particulier de $\varphi = \frac{\pi}{4} = 45°$, $\cos\varphi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,7$, la perte pour 100 en volts dans la ligne est égale à la *moitié* de la perte pour 100 en watts.

II. — *Ligne à courant diphasé.*

Il est évident que les conclusions précédentes s'appliquent encore directement à une ligne à courant diphasé à quatre conducteurs, car, dans ce cas, la conduite est constituée par deux lignes à courant alternatif distinctes.

Considérons maintenant une ligne à courant diphasé, à

Digitized by Google

trois conducteurs, et supposons d'abord que les circuits ne possèdent ni inductance, ni capacité, et soient

S la section commune des deux conducteurs distincts;

R la résistance de chacun d'eux;

S′ et R′ la section et la résistance du conducteur commun;

r la résistance de chacun des circuits de travail intercalé entre un conducteur distinct et le conducteur commun (r représente une résistance simple ou une quantité correspondant à une force contre-électromotrice dont la phase est exactement opposée à celle du courant).

Nous avons vu précédemment que la présence d'un conducteur commun aux deux sections a comme effet d'avancer le premier courant d'un angle α par rapport à la tension correspondante, à l'origine, et de retarder le second courant du même angle α par rapport à sa tension à l'origine. L'angle α est défini par la relation

$$\operatorname{tang}\left(\frac{\pi}{4}+\alpha\right)=\frac{R+2R'+r}{R+r}=1+\frac{2R'}{R+r}.$$

Nous avons encore montré que, dans les conditions de la pratique, l'angle α est toujours très petit et peut être négligé. On peut donc admettre que la phase du courant dans le fil commun est distante d'un huitième de période de celles des courants dans les fils extrêmes, et que sa moyenne efficace est sensiblement égale à la moyenne efficace de l'un des courants composants multipliée par $\sqrt{2}$.

En partant de cette hypothèse approchée, nous avons montré ([1]) que, en répartissant le métal entre les trois conducteurs dans le rapport

$$\frac{S'_1}{S'}=\frac{1,41}{1},$$

l'économie réalisée sur le poids de métal par rapport à la ligne à quatre conducteurs, à puissance, perte de tension et tension *à l'origine d'une section* égales, est d'environ 27 pour 100.

---

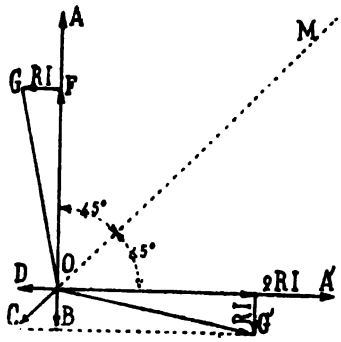
[1]) *Voir* page 166.

Digitized by Google

La perte de puissance dans une ligne à quatre conducteurs égaux est $4RI^2$. Nous avons vu qu'en supprimant l'un de ces quatre conducteurs, et en prenant l'un des trois fils restants comme conducteur commun, la perte de puissance dans la ligne est encore $4RI^2$. L'économie réalisée de la sorte est donc de 25 pour 100, comme dans le cas du courant triphasé; mais alors la tension entre les conducteurs extrêmes est égale à la tension dans une section multipliée par $\sqrt{2}$.

Cherchons la tension à l'extrémité de la ligne, dans la première section par exemple, dans le cas où les trois conducteurs ont même section. Employant une méthode analogue à celle de la figure 105, nous représentons sur la figure 107

Fig. 107.



par OA et OA' à 90° la tension efficace E aux bornes de chaque section, OA correspondant à la première section et OA' à la seconde.

Nous avons d'abord, dans le fil 1, une perte de tension $OB = RI$, dont la phase est à 180° de celle de la tension à l'origine; OB se retranche donc simplement de OA. Portons $AF = 2OB$. Le conducteur commun est parcouru par un courant

$$I\sqrt{2}\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{4}\right).$$

Il en résulte une perte de tension $OC = RI\sqrt{2}$, dont la phase est en retard de 45° sur OB; la quantité $RI\sqrt{2}$ doit être prise

Digitized by Google

avec le signe —, et par conséquent être portée suivant MO. Décomposons OC en deux éléments :

$$OB = RI \text{ suivant } AO;$$
$$OD = RI \text{ perpendiculaire à } OA.$$

OB se retranche simplement de OA. La tension E_1 cherchée est donc la résultante de deux composantes rectangulaires

$$(14) \qquad OF = E - RI - RI,$$

$$(15) \qquad FG = RI.$$

Par suite,

$$(16) \qquad E_1 = \sqrt{(E - 2RI)^2 + (RI)^2}.$$

Cette valeur est précisément celle que nous aurions obtenue pour une ligne formée de deux conducteurs de résistance R, conduisant un courant alternatif de puissance $\frac{P}{2}$ sous la tension E, avec un retard de phase φ du courant défini par $\tang\varphi = \frac{1}{2}$ (1). D'après ce que nous avons vu précédemment, nous pouvons en pratique négliger la composante à 90° et écrire

$$(17) \qquad E_1 = E - 2RI.$$

Pour la seconde section, on arriverait à un résultat analogue; mais, la composante à 90° étant OB, la tension à l'extrémité est OG′, dont la phase est *en retard* sur celle de OA′, tandis que la phase de OG est *en avance* sur OA.

Remarque. — Si la résistance du conducteur commun était $R' \neq R$, on aurait à décomposer $R'I\sqrt{2}$ en deux composantes rectangulaires égales à R′I. La relation (16) deviendrait

$$E_1 = \sqrt{[E - (R + R')I]^2 + (R'I)^2}.$$

(1) *Voir* page 195.

Digitized by Google

On aurait, par suite, sensiblement

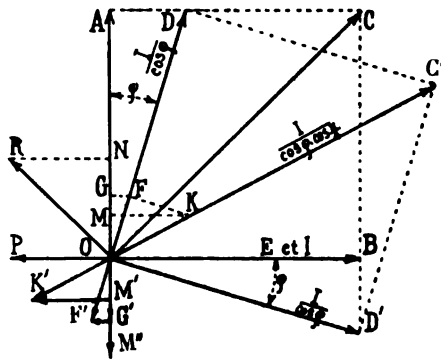
$$E_1 = E - (R + R')I. \tag{18}$$

Donc : *la perte de tension dans une ligne à courant diphasé, à trois conducteurs, alimentant des appareils sans inductance ni capacité, est pratiquement égale à celle qui se produirait dans une ligne à courant alternatif formée de l'un des conducteurs extrêmes et du conducteur commun, et conduisant un courant égal à celui d'une section.*

Admettons maintenant que la ligne à courant diphasé, à trois conducteurs égaux, alimente des appareils possédant une inductance, et négligeons encore, dans une première approximation, la faible différence de phase du courant par rapport à la tension à l'origine due au conducteur commun.

Sur la figure 108, OA et OB représentent la tension effi-

Fig. 108.



cace E à l'origine, dans les deux sections. Ces longueurs représentent également, à une échelle convenable, le courant effi-cace $I = \frac{\frac{1}{2}P}{E}$. Par suite, OC est le courant efficace $I\sqrt{2}$ qui circulerait dans le fil commun si les appareils récepteurs ne retardaient pas le courant. $OD = OD' = \frac{I}{\cos\varphi}$ représentent

Digitized by Google

les courants réels dans les fils extrêmes et, par conséquent,

$$OC' = \frac{I}{\cos\varphi . \cos\frac{\pi}{4}}$$

est le courant dans le fil commun.

Considérons la première section, par exemple. La tension efficace E_1 à l'extrémité de cette section est la résultante de la tension E à l'origine et des pertes de tension dans le conducteur I et le conducteur commun; ces dernières quantités doivent être portées dans le sens DO et C'O. Comme précédemment, nous décomposons chacune de ces pertes en deux composantes rectangulaires, l'une suivant la tension OA, l'autre perpendiculaire à OA. En ajoutant algébriquement les composantes de même direction, nous obtiendrons finalement deux composantes rectangulaires uniques, dont la résultante est la tension cherchée. Soient

$$OF' = OF = R\frac{I}{\cos\varphi}.$$

En menant FK perpendiculaire à OD, on a évidemment

$$OK = OK' = R\frac{I}{\cos\varphi . \cos\frac{\pi}{4}};$$

OF' se décompose en deux éléments :

$$OG' = R\frac{I}{\cos\varphi}\cos\varphi = RI,$$

$$G'F' = RI \operatorname{tang}\varphi.$$

OK' se décompose également en deux éléments :

$$OM' = G'M'' = R\frac{I}{\cos\varphi . \cos\frac{\pi}{4}}\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) = RI(1 - \operatorname{tang}\varphi),$$

$$M'K' = R\frac{I}{\cos\varphi . \cos\frac{\pi}{4}}\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) = RI(1 + \operatorname{tang}\varphi).$$

Digitized by Google

Portons

$$AN = OM'' = OG' + OM' = 2RI - RI \operatorname{tang}\varphi,$$
$$NR = OP = G'F' + M'K' = RI + 2RI \operatorname{tang}\varphi.$$

La tension cherchée est donc

$$(19)\quad \begin{cases} E_1 = \sqrt{\overline{ON}^2 + \overline{OP}^2} \\ \quad = \sqrt{[(E - 2RI) + RI \operatorname{tang}\varphi]^2 + (2RI \operatorname{tang}\varphi + RI)^2}. \end{cases}$$

Dans le cas de la ligne à courant alternatif, la tension à l'extrémité était égale à

$$\sqrt{(E - 2RI)^2 + (2RI \operatorname{tang}\varphi)^2}.$$

Si la résistance du conducteur commun était $R' \neq R$, il suffirait de remplacer $OK = R \dfrac{I}{\cos\varphi . \cos\frac{\pi}{4}}$ par $R' \dfrac{I}{\cos\varphi . \cos\frac{\pi}{4}}$, et la relation (19) deviendrait

$$(20)\quad E_1 = \sqrt{[E - (R + R')I + R'I \operatorname{tang}\varphi]^2 + [(R + R')I \operatorname{tang}\varphi + R'I]^2}.$$

On établirait aisément que la tension à l'extrémité de la seconde section est

$$(21)\quad E_2 = \sqrt{[E - (R + R')I - R'I \operatorname{tang}\varphi]^2 + [(R + R')I \operatorname{tang}\varphi - R'I]^2}.$$

Remarque. — Dans le cas particulier où l'on a

$$\varphi = \frac{\pi}{4} = 45^\circ, \qquad \operatorname{tang}\varphi = 1,$$

condition dont on se rapproche souvent dans la pratique, si nous négligeons la composante normale, les équations (20) et (21) deviennent

$$(22)\qquad E_1 = E - RI,$$

$$(23)\qquad E_2 = E - (R + 2R')I.$$

Digitized by Google

III. — *Ligne à courant triphasé.*

1° *Cas de charges égales dans les trois sections.*

Soit une ligne à courant triphasé formée de trois conducteurs de même résistance R, transmettant une puissance initiale P également répartie entre les trois sections. Supposons le générateur monté en étoile, et soient :

E la tension efficace entre deux bornes du générateur;

I le courant efficace dans chacun des conducteurs;

J le courant efficace dans l'une des sections réceptrices en triangle.

Supposons d'abord les circuits sans inductance ni capacité. On a :

1°

$$P = EI\sqrt{3},$$

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}};$$

2° La tension produite dans chaque section génératrice est

$$\frac{E}{\sqrt{3}};$$

3° La perte de tension dans la ligne, c'est-à-dire la différence $E - E_1$ de la tension entre deux bornes de départ de la ligne et celle à l'extrémité, est

$$RI\sqrt{3};$$

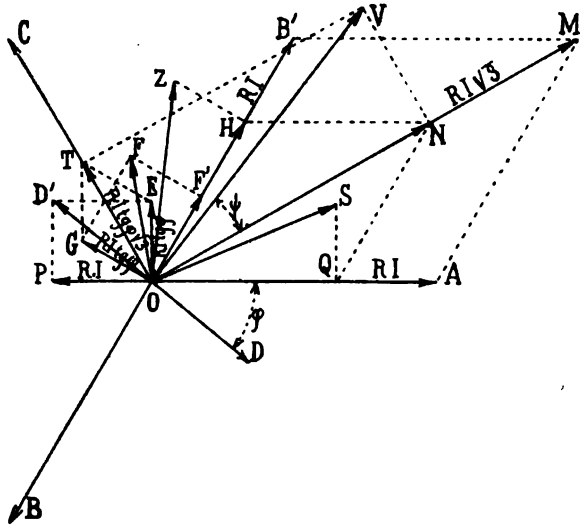
4° La phase du courant dans une section réceptrice en triangle coïncide avec celle de la tension à l'origine dans cette section;

5° La ligne à courant triphasé réalise une économie de métal de 25 pour 100 par rapport à la ligne à courant alternatif, à égalité de puissance, de tension et de perte de puissance.

Digitized by Google

Supposons maintenant les circuits récepteurs doués d'inductance, et représentons par les trois vecteurs égaux et

Fig. 109.



à 120°, $OA = OB = OC = \frac{E}{\sqrt{3}}$ (*fig.* 109), les tensions engendrées par les trois sections du générateur en étoile.

La tension efficace à l'origine, entre les bornes 1 et 2 par exemple, s'obtient évidemment en composant OA avec OB changé de signe, c'est-à-dire avec OB'. Leur résultante est

$$OM = OA\sqrt{3} = E.$$

Les appareils récepteurs peuvent être montés de deux manières différentes :

1° En étoile : la self-induction produit alors un certain retard de phase du courant dans chaque section des récepteurs et, par suite, dans chaque conducteur de la ligne;

2° En triangle : la self-induction produit dans chaque section des récepteurs un retard de phase du courant. Le courant dans un fil de ligne étant à chaque instant égal à la différence algébrique des courants dans les deux sections réceptrices

Digitized by Google

adjacentes, se trouve par conséquent retardé de la même quantité.

Soit donc φ le retard de phase du courant dans l'un des fils de ligne par rapport à la tension produite par la section correspondante de l'étoile génératrice.

La puissance à l'origine est évidemment, en appelant I′ le courant efficace dans chaque conducteur,

$$(24) \qquad P = 3\frac{E}{\sqrt{3}} I' \cos\varphi = EI'\sqrt{3}\cos\varphi = EI\sqrt{3},$$

d'où

$$I' = \frac{I}{\cos\varphi}.$$

La tension à l'extrémité de la section considérée est égale à la résultante des différences de potentiel entre les extrémités des deux conducteurs correspondants et le centre de l'étoile. Si le sens positif de la tension est pris suivant OA, nous devrons prendre la seconde différence de potentiel avec le signe —, c'est-à-dire suivant OB′.

En tenant compte de cette remarque, et en procédant comme dans le cas d'un courant alternatif, nous obtenons les deux tensions composantes OS, OZ, dont la résultante OV est la tension cherchée, à l'extrémité de la ligne.

Mais nous pouvons encore procéder d'une façon différente. Considérons en effet les composantes de OS et OZ :

$$OQ = OH = \frac{E}{\sqrt{3}} - RI,$$

suivant OA et OB′;

$$OE = OG = RI \operatorname{tang}\varphi,$$

perpendiculaires à OA et OB′.

Ces quatre quantités composées deux à deux donnent les deux nouvelles : ON suivant la tension à l'origine, et OT perpendiculaire à la première.

On a évidemment

$$OM = E,$$
$$ON = \left(\frac{E}{\sqrt{3}} - RI\right)\sqrt{3} = E - RI\sqrt{3},$$
$$OT = NV = RI \operatorname{tang}\varphi\sqrt{3} = RI\sqrt{3}\operatorname{tang}\varphi.$$

Digitized by Google

La tension efficace à l'extrémité de la ligne est

$$(25)\quad OV = \sqrt{\overline{ON}^2 + \overline{OT}^2} = \sqrt{(E - RI\sqrt{3})^2 + (RI\sqrt{3}\,\text{tang}\,\varphi)^2}.$$

La phase est *en avance* sur celle de la tension à l'origine d'un angle ψ défini par la relation

$$(26)\qquad \text{tang}\,\psi = \frac{OT}{ON} = \frac{RI\sqrt{3}\,\text{tang}\,\varphi}{E - RI\sqrt{3}}.$$

Remarquons que la composante ON suivant la tension à l'origine est précisément égale à la tension $E - RI\sqrt{3}$ qui existerait à l'extrémité de la ligne si la puissance P était transmise sans retard de phase du courant.

En comparant les relations (12) et (25), (11) et (26), on voit que la section considérée de la ligne à courant triphasé se comporte, au point de vue de la tension, exactement de même qu'une ligne à courant alternatif de résistance totale R, transmettant la puissance initiale P sous forme d'un courant de tension E et d'intensité $I\sqrt{3}$, avec le même angle φ de différence de phase.

Nous pouvons donc encore, dans la pratique, négliger la composante à 90°, $OT = RI\sqrt{3}\,\text{tang}\,\varphi$, et prendre pour valeur de la tension à l'extrémité de la ligne :

$$(27)\qquad E_1 = E - RI\sqrt{3}.$$

Nous énoncerons donc la règle suivante :

La perte de tension dans une ligne à courant triphasé, pour une puissance et une tension initiales données, est pratiquement indépendante de l'angle de différence de phase du courant; elle est égale au produit de la résistance R *de l'un des conducteurs par le courant* I *dans ce conducteur, correspondant à la puissance* P *sans décalage, multiplié par* $\sqrt{3}$.

En appelant comme précédemment J le courant efficace *sans décalage* dans l'une des sections réceptrices en triangle,

Digitized by Google

3J est le courant total sans décalage dans les récepteurs, et l'on a

$$3J = 3\frac{I}{\sqrt{3}} = I\sqrt{3} = \frac{P}{E}.$$

La quantité $I\sqrt{3}$ peut donc être appelée le *courant triphasé total* sans décalage. Par suite, la perte de tension dans la ligne est égale au produit de la résistance R de chacun des trois conducteurs par le courant triphasé total sans décalage, *obtenu en divisant la puissance initiale par la tension à l'origine.*

2° *Cas d'une seule section chargée.*

Nous avons montré précédemment [1] que le montage en étoile de récepteurs à courant alternatif n'assure aucune indépendance à ces appareils, à moins qu'on n'emploie un quatrième fil. Du reste, l'interruption de deux sections entraîne l'interruption de la troisième. Nous admettrons donc que les récepteurs à courant alternatif, tels que les lampes, sont montés en triangle à l'extrémité de la ligne, les récepteurs à courant triphasé, tels que les moteurs, ayant leurs trois sections disposées à volonté en triangle ou en étoile.

Nous admettrons encore que le générateur (machine ou transformateur) possède une réaction intérieure assez faible pour que, malgré les différences de charge dans les trois sections, les tensions à l'origine de ces trois sections puissent être maintenues égales et constantes, et que leurs phases diffèrent toujours entre elles d'un tiers de période.

E étant la tension entre deux bornes de départ, et J le courant dans chacune des sections réceptrices, lorsque celles-ci sont également chargées, le courant dans chaque fil de ligne est

$$I = J\sqrt{3},$$

et la chute de tension dans chaque section de la ligne est

$$RI\sqrt{3}.$$

---

[1] *Voyez* p. 185 et suivantes.

Digitized by Google

Supposons que la ligne n'alimente que des lampes à incandescence. Éteignons les lampes de deux sections, et admettons que le courant dans la section réceptrice active, et par suite aussi dans les deux fils de ligne correspondants, soit encore égal à J. La phase de ce courant coïncide avec celle de la tension à l'origine. La chute de tension dans la section considérée est donc

$$2\,RJ = \frac{2}{3}\,RI\sqrt{3}.$$

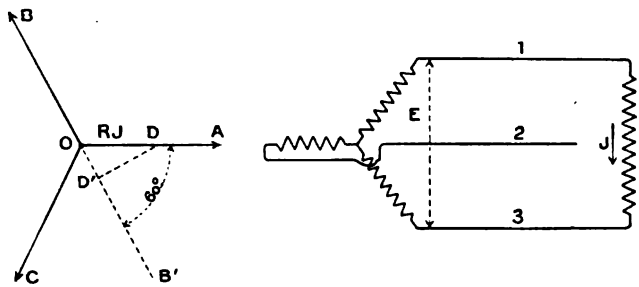
Cherchons maintenant la chute de tension dans les deux sections non chargées, et soient (*fig.* 110) :

OA = E la tension à l'origine de la section chargée (fils 1 et 3);

OB = OC = E la tension à l'origine des deux sections non chargées (fils 2 et 1, 3 et 2).

La méthode que nous avons exposée plus haut, pour la détermination de la perte de tension, consiste à projeter sur la

Fig. 110.



tension E à l'origine les moyennes des diverses pertes de tension dans leurs phases respectives, ces pertes étant représentées par conséquent par des droites faisant avec l'axe de projection des angles correspondant aux différences de phase entre la tension à l'origine et les courants.

Considérons la section comprenant les fils 2 et 1. Le fil 2 ne débitant aucun courant, la chute de tension dans cette section ne sera produite que par le courant J circulant dans le fil 1. La phase de ce courant par rapport à la tension OB

Digitized by Google

est suivant OA. Portons, sur OA, OD = RJ, et projetons cette longueur sur BO prolongé; l'angle AOB′ étant égal à 60°, on a

$$OD' = \frac{1}{2} OD = \frac{1}{2} RJ = \frac{1}{6} RI\sqrt{3}.$$

OD′ est bien une *perte* de tension, car le fil 1 sert de retour au fil 2, et OD′ est de signe contraire à la tension OB.

Pour la troisième section, on verrait de même que la chute de tension dans le fil 2 est nulle, et que la perte dans le fil 3, relativement à la tension OC, est

$$\frac{1}{2} RJ = \frac{1}{6} RI\sqrt{3}.$$

Donc :

1° La chute de tension dans la section chargée de la ligne est égale aux deux tiers de la perte $RI\sqrt{3}$ qui se produit lorsque les deux autres sections débitent le même courant que la première.

2° La chute de tension dans chacune des sections non chargées est égale au sixième de cette perte $RI\sqrt{3}$.

3° La tension à l'extrémité de l'une quelconque des sections non chargées est supérieure à celle existant à l'extrémité de la section chargée, d'une quantité

$$\frac{2}{3} RI\sqrt{3} - \frac{1}{6} RI\sqrt{3} = \frac{1}{2} RI\sqrt{3}.$$

3° *Cas de deux sectoins chargées.*

Éteignons les lampes d'une seule section, et supposons que les deux sections réceptrices alimentées par les fils 1 et 3, 2 et 1, débitent le courant J. La perte de tension dans la section (1-3) (*fig.* 110), se compose des pertes dans le fil 1 et dans le fil 3. Le courant dans le fil 3, retour du fil 1, est J, et sa phase est à 180° de celle de la tension OA; la perte dans ce fil est donc

$$RJ = \frac{1}{3} RI\sqrt{3}.$$

Digitized by Google

Le courant dans le fil 1 est la résultante :

1° Du courant J qui traverserait le fil 1 si la section (1-3) était seule chargée, et dont la phase est suivant OA;

2° Du retour du courant J qui parcourt le fil 2, dirigé par suite suivant OB'. Le courant dans le fil 1 est donc suivant la bissectrice de l'angle AOB'. Sa phase est en retard de 30° sur celle de la tension OA à l'origine de la section (1-3). La chute de tension dans le fil 1, relativement à la section (1-3), est donc

$$RJ\sqrt{3}\cos\frac{\pi}{6} = \frac{1}{2}RI\sqrt{3},$$

et la chute de tension dans la section considérée est

$$\frac{1}{3}RI\sqrt{3} + \frac{1}{2}RI\sqrt{3} = \frac{5}{6}RI\sqrt{3}.$$

La chute de tension dans la section (2-1) est évidemment la même que celle dans la section (1-3). On a en effet :

Perte dans le fil 2 :

$$RJ = \frac{1}{3}RI\sqrt{3};$$

Perte dans le fil 1 :

$$RJ\sqrt{3}\cos\frac{\pi}{6} = \frac{1}{2}RI\sqrt{3}.$$

Leur somme est égale à

$$\frac{5}{6}RI\sqrt{3}.$$

Déterminons la chute de tension dans la section (3-2) non chargée.

La tension à l'origine est OC. Le courant dans le fil 3 est le retour du courant dans le fil 1; sa moyenne est donc J, et sa phase est suivant AO prolongé. La perte de tension dans ce fil est donc

$$RJ\cos\frac{\pi}{3} = \frac{1}{2}RJ.$$

Le courant dans le fil 2 est J, et il est dirigé suivant OB;

Digitized by Google

la perte de tension dans ce fil est donc

$$RJ \cos\frac{\pi}{3} = \frac{1}{2} RJ.$$

Cette dernière quantité est bien une *perte* de tension, car le courant J se projette sur CO prolongé; cette projection est de signe contraire au courant dans le fil 3, auquel le fil 2 sert de retour.

La chute de tension dans la section (3-2) est donc

$$\frac{1}{2} RJ + \frac{1}{2} RJ = \frac{1}{3} RI\sqrt{3}.$$

Par conséquent, si deux sections d'une ligne à courant triphasé débitent chacune le courant J sur des récepteurs ne produisant aucun décalage, la troisième section étant complètement déchargée, la chute de tension dans chacune des sections chargées est égale aux cinq sixièmes, et celle dans la section non chargée au tiers de la chute de tension qui se produirait si chacune des trois sections réceptrices absorbait le courant J.

La différence entre les tensions disponibles à l'extrémité de la section non chargée et des sections chargées est

$$\frac{5}{6} RI\sqrt{3} - \frac{1}{3} RI\sqrt{3} = \frac{1}{2} RI\sqrt{3},$$

c'est-à-dire qu'elle est égale à la moitié de la perte de tension qui se produirait dans la ligne si chacune des sections réceptrices absorbait le courant J. Cette différence entre les tensions est la même que dans le cas précédent.

4° *Ligne mixte à courant triphasé et à courant alternatif* (1).

Ce système consiste à relier, comme d'ordinaire, les moteurs aux trois fils de la canalisation, mais à monter toutes les lampes entre deux mêmes conducteurs. On peut de la

(1) *Voyez* une Étude de l'Auteur dans l'*Industrie électrique*, n° 90, 25 septembre 1895, page 404, et n° 118, 25 novembre 1896, page 517.

Digitized by Google

sorte régler exactement la tension dans la section d'éclairage, quelques variations de tension dans les deux autres sections qui n'alimentent que des moteurs présentant une importance moindre que pour le réseau d'éclairage.

Ce système a été appliqué par la maison Siemens et Halske à la distribution d'énergie aux gares de Dresde.

Soient

$$P_m = EI_m \sqrt{3} \cos \varphi$$

la puissance à l'origine, correspondant aux moteurs, et

$$P_l = EI_l$$

la puissance à l'origine, correspondant aux lampes à incandescence.

I_m est le courant qui circulerait dans chacun des trois conducteurs de la ligne si les moteurs fonctionnaient seuls.

I_l est le courant qui circulerait dans les deux conducteurs de la section commune (1-3) si les lampes fonctionnaient seules.

Si les moteurs et les lampes fonctionnent simultanément, le conducteur distinct 2, par exemple, est parcouru par le courant I_m.

Le courant dans le fil 1 est la résultante des courants I_m et I_l faisant entre eux l'angle $\frac{\pi}{6} - \varphi$.

Le courant dans le conducteur 3 est la résultante des courants I_m et I_l, faisant entre eux un angle $\frac{\pi}{6} + \varphi$.

Les courants dans les conducteurs 1 *et* 3 *de la section commune ne sont donc égaux que dans le cas particulier où l'angle* φ *est nul.* C'est ce qui aurait lieu si la ligne alimentait des moteurs synchrones dont l'excitation serait réglée de façon que le courant coïncidât en phase avec la tension.

Dans le cas de moteurs d'induction, le courant dans le fil 1 est donc supérieur à celui du conducteur 3.

Exemple. — La puissance initiale est répartie également entre les lampes montées à l'extrémité de la section (1-3) et les moteurs produisant un retard de phase $\varphi = 45°$; $\cos \varphi = 0,7$.

Digitized by Google

On a, dans ce cas,

$$I_l = 1,225 I_m,$$

et le rapport des courants dans le fil 3 et le fil 1 est égal à 0,8.

Si le courant des moteurs dans chaque fil de la ligne, et par suite le courant dans le fil 2, est de 100 ampères, on a

Courant dans le fil 1, en ampères.....	220
Courant dans le fil 2, en ampères.....	100
Courant dans le fil 3, en ampères.....	177

Ce système de ligne mixte ne s'est pas répandu. En employant des génératrices à faible réaction d'induit, ainsi qu'une ligne et des transformateurs ne donnant lieu qu'à une faible chute de tension à pleine charge, on peut aisément monter les lampes sur les trois sections; malgré des différences importantes dans les charges des trois sections, les trois tensions aux extrémités de la ligne diffèrent peu entre elles. En outre, les génératrices sont mieux utilisées que si l'on montait toutes les lampes sur une même section.

§ IV. — Décalage en divers points d'une distribution.

I. — *Décalage au point d'utilisation.*

Considérons une distribution à courant alternatif desservant simultanément des appareils à inductance, tels que des moteurs asynchrones, absorbant ensemble une puissance P_m et produisant un retard de phase du courant φ, et des appareils sans inductance, tels que des lampes à incandescence, consommant une puissance P_l.

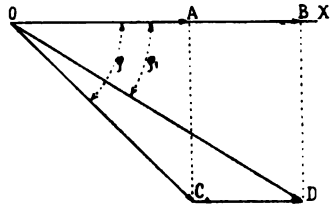
Admettons que la résistance des conducteurs reliant les appareils récepteurs au point de distribution considéré soit assez faible pour qu'on puisse la négliger.

Soit OX une droite (*fig.* 111) qui, tournant autour du point O en sens inverse des aiguilles d'une montre, représentera la phase de la tension au point de distribution. Menons OC faisant avec OX l'angle φ, et portons sur OX les

Digitized by Google

longueurs OA et AB représentant les puissances P_m et P_l. Élevons les perpendiculaires AC et BD sur OX, et menons CD parallèle à OX. OD est, en grandeur et en phase, la puissance *apparente* au point de distribution, et l'angle BOD est l'angle résultant φ_1 de retard de phase du courant. En effet,

Fig. 111.



OC et CD sont respectivement proportionnels au courant des moteurs et au courant des lampes. Le courant résultant est donc suivant OD. Ce courant multiplié par la tension donne OD, et l'on a

$$OD \cos\varphi_1 = OA + AB.$$

D'autre part,

$$(1) \qquad \operatorname{tang}\varphi_1 = \frac{BD}{OA + AB} = \frac{AC}{OA + AB} = \frac{P_m \operatorname{tang}\varphi}{P_m + P_l},$$

d'où l'on tire

$$(2) \qquad \cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_m \operatorname{tang}\varphi}{P_m + P_l}\right)^2}}.$$

Admettons que l'on ait, dans le cas de moteurs d'induction,

$$\varphi = \frac{\pi}{4}, \qquad \cos\varphi = 0,7, \qquad \operatorname{tang}\varphi = 1.$$

Les relations (1) et (2) donnent alors

$$(3) \qquad \operatorname{tang}\varphi_1 = \frac{P_m}{P_m + P_l},$$

$$(4) \qquad \cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{P_m}{P_m + P_l}\right)^2}}.$$

Digitized by Google

D'ailleurs, la méthode de calcul la plus simple consiste à déterminer $\tang \varphi_1$ au moyen de la relation (1), puis à chercher $\cos \varphi_1$ sur une Table trigonométrique.

Soit E_1 la tension au point d'utilisation. Les courants dans les deux séries de récepteurs sont

$$\frac{P_m}{E_1} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \quad \text{et} \quad \frac{P_l}{E_1}.$$

Les côtés du triangle OCD représentent, à un facteur près, les deux courants composants et le courant résultant I, dans leurs phases relatives.

Exemple. — Soient $\cos \varphi = 0,7$ et $P_m = P_l$; on a alors

$$\tang \varphi_1 = \frac{P_m}{2 P_m} = \frac{1}{2},$$
$$\cos \varphi_1 = 0,894.$$

Remarque I. — Si l'on avait affaire à des récepteurs produisant une avance de phase, tels que des appareils possédant de la capacité ou des moteurs synchrones surexcités, on déterminerait d'une façon analogue l'angle d'avance de phase résultant. Seulement l'angle φ devrait être porté au-dessus de la droite OX.

Remarque II. — Dans le cas de courant triphasé, on calculera de la même façon le courant et l'angle de différence de phase résultants à chacune des trois bornes.

II. — *Décalage à l'usine génératrice.*

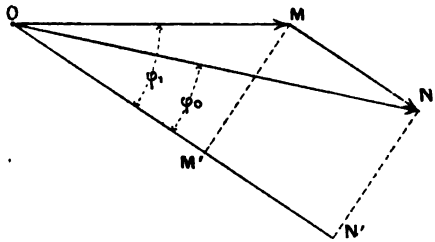
Portons sur la droite OM (*fig.* 112) une longueur OM représentant la tension E_1 au point de distribution, et menons ON′ faisant avec OM l'angle φ_1 que nous avons déterminé ci-dessus, c'est-à-dire l'angle de la différence de phase entre la tension au point de distribution et le courant I dans la ligne.

Soit 2R la résistance de cette dernière, que nous supposons sans inductance ni capacité. Menons MN parallèle à ON′

Digitized by Google

et égal à $2RI$. ON représente évidemment la tension E_0 à l'origine de la ligne, et l'angle NON′ mesure la différence de

Fig. 112.



phase φ_0 entre la tension à l'origine et le courant fourni par l'usine génératrice.

Tirons MM′ et NN′ perpendiculaires sur ON′; on a

$$\sin\varphi_0 = \frac{NN'}{ON} = \frac{MM'}{E_0},$$

$$\sin\varphi_1 = \frac{MM'}{OM} = \frac{MM'}{E_1},$$

d'où

$$\frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi_1} = \frac{E_1}{E_0}, \tag{5}$$

c'est-à-dire que les sinus des angles de différence de phase entre la tension et le courant sont inversement proportionnels aux tensions aux points correspondants.

On déduit de la relation (5)

$$\cos\varphi_0 = \sqrt{1 - \frac{E_1^2}{E_0^2}(1 - \cos^2\varphi_1)}. \tag{6}$$

Remarque I. — Si P_0 est la puissance à l'origine, et P_1 la puissance à l'extrémité de la ligne, on a évidemment

$$P_0 = P_1 + 2RI^2 \tag{7}$$

ou

$$E_0 I \cos\varphi_0 = E_1 I \cos\varphi_1 + 2RI^2. \tag{8}$$

Digitized by Google

Remarque II. — Dans le cas de courant triphasé, il suffit de remplacer, dans le diagramme précédent, $2RI$ par $RI\sqrt{3}$ porté suivant MN faisant avec OM l'angle φ_1.

Dans la seconde expression, R désigne la résistance de l'un des trois conducteurs égaux, et I le courant qui y circule.

§ V. — Inductance et capacité des lignes.

I. — *Inductance des lignes aériennes.*

Ligne à courant alternatif. — Si nous considérons une ligne de longueur l kilomètres, formée de deux conducteurs cylindriques parallèles de rayon r centimètres, situés à une distance entre axes d centimètres, l'inductance de cette ligne, *par conducteur*, est

$$L = l \times 10^{-1}\left(2\log_e\frac{d}{r} + \frac{1}{2}\right) \text{ millihenrys.}$$

Nous empruntons à MM. Houston et Kennelly le Tableau ci-après, en l'adaptant aux mesures françaises.

Ce Tableau donne l'inductance en millihenrys par kilomètre et par conducteur d'une ligne aérienne pour divers diamètres de fil de cuivre et pour différentes distances entre axes des deux conducteurs.

Pour une ligne à deux conducteurs, il faut doubler les nombres du Tableau.

Exemple. — Soit une ligne à courant alternatif de 60^{km} de longueur, transmettant une puissance initiale apparente de 1000 kilovoltampères, soit 50 ampères sous 20000 volts, à la fréquence de 50 périodes par seconde, à des appareils ne décalant pas le courant.

La ligne est formée de deux fils de cuivre de 8^{mm} de diamètre, soit 50^{mm^2} de section, distants de 80^{cm} entre axes. L'inductance par kilomètre, pour les deux fils, est d'environ 2,25 millihenrys.

D'après l'hypothèse, le courant de ligne coïncide en phase avec la tension E_1 aux bornes des récepteurs. La composante de la perte de tension due à la résistance ohmique de la ligne

Digitized by Google

NUMÉRO de la jauge américaine	0000	000	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DIAMÈTRE en millim...	11,68	10,4	9,27	8,25	7,35	6,544	5,827	5,19	4,62	4,115	3,665	3,264	2,907	2,588	2,305	2,053
SECTION en millimètres carrés	107	85	67,4	53,5	42,4	33,6	26,7	21,2	16,8	13,3	10,6	8,4	6,6	5,25	4,2	3,3
Distance des fils entre axes, en centimètres :																
7,6	0,567	0,589	0,613	0,636	0,660	0,683	0,706	0,730	0,753	0,776	0,800	0,823	0,846	0,870	0,893	0,904
15,2	0,705	0,730	0,735	0,776	0,800	0,823	0,846	0,870	0,893	0,916	0,939	0,962	0,986	1,009	1,032	1,056
23	0,787	0,811	0,834	0,857	0,881	0,904	0,928	0,951	0,974	0,997	1,021	1,044	1,068	1,091	1,114	1,137
30	0,845	0,869	0,936	0,915	0,938	0,962	0,985	1,008	1,032	1,055	1,079	1,102	1,125	1,148	1,171	1,195
46	0,923	0,950	0,973	0,997	1,020	1,044	1,067	1,090	1,113	1,137	1,160	1,183	1,206	1,230	1,254	1,277
61	0,985	1,008	1,031	1,055	1,078	1,102	1,125	1,148	1,171	1,195	1,218	1,241	1,265	1,288	1,311	1,334
76	1,030	1,053	1,076	1,100	1,123	1,146	1,169	1,193	1,216	1,240	1,263	1,286	1,310	1,331	1,356	1,380
91	1,066	1,090	1,115	1,136	1,160	1,183	1,206	1,230	1,253	1,275	1,299	1,323	1,346	1,370	1,393	1,416
122	1,124	1,147	1,171	1,194	1,216	1,241	1,264	1,287	1,311	1,331	1,357	1,380	1,405	1,428	1,451	1,473
153	1,169	1,193	1,216	1,238	1,264	1,286	1,309	1,332	1,355	1,380	1,403	1,426	1,449	1,472	1,495	1,520
183	1,206	1,230	1,253	1,276	1,299	1,322	1,346	1,370	1,393	1,416	1,439	1,462	1,485	1,509	1,532	1,555
213	1,230	1,260	1,283	1,307	1,330	1,354	1,375	1,400	1,423	1,445	1,469	1,493	1,516	1,540	1,563	1,586
244	1,264	1,286	1,310	1,333	1,357	1,381	1,403	1,425	1,450	1,473	1,496	1,520	1,543	1,566	1,591	1,612

Digitized by Google

coïncide donc également en phase avec E_1, et sa valeur est

$$18 \times \frac{50}{50} \times 60 \times 2 = 2160 \text{ volts},$$

soit 10,8 pour 100 de la tension à l'origine.

La force électromotrice d'induction est

$$2\pi n LI = 2 \times 3,14 \times 50 \times 2,25 \times 10^{-3} \times 60 \times 50 = 2120 \text{ volts}.$$

Cette composante de la perte de tension en ligne est à angle droit avec le courant de ligne, ou encore avec la tension E_1, et l'on a

$$E_1 + 2160 = \sqrt{20000^2 - 2120^2} = 19887 \text{ volts}$$

et par suite

$$E_1 = 19887 - 2160 = 17727 \text{ volts}.$$

La perte de tension est donc

$$20000 - 17727 = 2273 \text{ volts},$$

soit 11,365 pour 100 de la tension à l'origine. L'inductance de la ligne accroît donc la perte de tension, dans ce cas, de

$$2273 - 2160 = 113 \text{ volts},$$

soit 5,2 pour 100 de la valeur de la perte de tension par résistance ohmique, ou 0,56 pour 100 de la tension à l'origine.

En appelant φ l'angle de retard de phase du courant, dû à l'inductance de la ligne, par rapport à la tension à l'origine, on a

$$\sin\varphi = \frac{2120}{20000},$$

$$\cos\varphi = \frac{E_1 + 2160}{20000} = 0,99435.$$

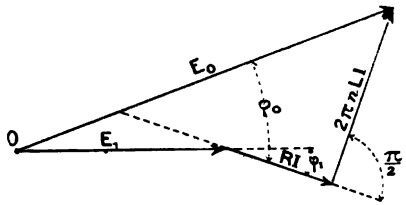
La figure 113 représente le diagramme des forces électromotrices dans le cas où les récepteurs retardent la phase du courant. L'accroissement de la chute de tension dû à l'inductance de la ligne est plus grand que dans le cas précédent. Si l'angle φ_1 de retard de phase produit par les récepteurs

Digitized by Google

est grand, la chute supplémentaire de tension due à l'inductance peut être considérable.

Si les récepteurs avancent la phase du courant par rapport à la tension E_1 à leurs bornes, l'angle φ_1 doit être porté au-dessus de E_1, et l'on voit aisément que la chute totale de

Fig. 113.



tension dans la ligne est plus petite que dans les deux cas précédents. Pour des valeurs données de n et de I on peut choisir L et φ_1 *de telle sorte que la tension* E_1 *à l'extrémité de la ligne soit égale ou même supérieure à la tension* E_0 *à l'origine, entre certaines limites de la résistance de la ligne.*

Remarque. — La composante $2\pi n$LI est proportionnelle à la fréquence n.

Ligne à courant triphasé. — Considérons une ligne à courant triphasé composée de trois conducteurs disposés suivant un triangle équilatéral, et transmettant une puissance initiale apparente

$$P = EI\sqrt{3}$$

à des récepteurs ne décalant pas le courant, et répartis uniformément sur les trois sections. Dans la figure 114, OA, OB, OC représentent les courants maxima, ou, à un facteur près, leurs moyennes efficaces, dans les trois fils de ligne. La tension entre les bornes 1 et 3 est suivant OD. Le flux produit par le courant du fil 1 dans la section considérée est à chaque instant proportionnel au courant dans ce fil; il en est de même pour le fil 3. Le flux total produit par les conducteurs 1 et 3 dans la partie de leur plan comprise entre eux est donc proportionnel à la résultante de ces courants,

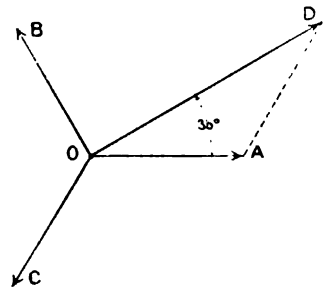
Digitized by Google

c'est-à-dire à OD, et sa phase coïncide avec celle de la tension entre les bornes 1 et 3. Or on a

$$OD = I\sqrt{3}.$$

Donc : pour trouver l'inductance par kilomètre de la section 1-3, il suffit de chercher dans le Tableau l'inductance *pour un conducteur* d'une ligne à courant alternatif ayant

Fig. 114.



même diamètre de fil et même distance entre axes des conducteurs, et de multiplier par $\sqrt{3}$ le nombre trouvé (au lieu de multiplier par 2, comme dans le cas de la ligne à courant alternatif).

Si la puissance P était transmise sous forme de courant alternatif de même tension et de même fréquence par les deux fils 1 et 3, en conservant le même diamètre et la même distance entre axes, le flux total serait proportionnel à

$$I\sqrt{3} \times 2.$$

La force électromotrice d'induction serait donc deux fois plus grande que celle dans le cas considéré ci-dessus.

Mais il faut remarquer que, pour une même perte en ligne, la section de chaque conducteur de la ligne à courant alternatif serait double de celle d'un conducteur de la ligne à courant triphasé; son diamètre serait donc 1,41 fois celui du conducteur de la ligne à courant triphasé. Il en résulte que la force électromotrice d'induction dans la ligne à courant triphasé est un peu plus de la moitié de celle qui se produit dans la ligne à courant alternatif.

Digitized by Google

II. — *Résistance d'un fil au courant alternatif.*

Lorsqu'un fil est parcouru par un courant alternatif, la densité de courant n'est pas la même en tous les points d'une même section transversale. Cette densité est minimum suivant l'axe du conducteur; elle croît de l'axe jusqu'à la surface extérieure, où elle est maximum.

Cette localisation du courant dans les couches extérieures est d'autant plus accentuée que la fréquence du courant est plus grande. Il en résulte un accroissement apparent de la résistance.

Ce phénomène a été analysé par Sir W. Thomson. Nous empruntons à l'Ouvrage de M. Fleming (1) les nombres du Tableau ci-dessous, établi pour les trois fréquences de 80, 100 et 133 périodes par seconde.

FRÉQUENCE en périodes par seconde.	DIAMÈTRE du conducteur de cuivre.	SECTION du conducteur.	ACCROISSEMENT de la résistance au-dessus de la résistance ordinaire. Pour 100.
	mm	mm²	
80	10	78,54	Inférieur à 0,01
	15	176,7	2,5
	20	314,16	8
	25	490,8	17,5
	40	1256	68
	100	7854	3,8 fois.
	1000	785400	35 fois.
100	9	63,62	Inférieur à 0,01
	13,4	141,3	2,5
	18	254,4	8
	22,4	394	17,5
133	7,75	47,2	Inférieur à 0,01
	11,61	106	2,5
	15,5	189	8
	19,36	294	17,5

(1) *Voir* FLEMING, *The alternate current transformer*, t. II.

Digitized by Google

En désignant par R la résistance ordinaire d'un fil donné, et par δ l'accroissement de résistance correspondant à la fréquence, la résistance de ce fil au courant alternatif est

$$R' = R(1 + \delta).$$

La perte de puissance dans ce fil est égale au produit de la résistance R' par le carré du courant efficace

$$w = R(1 + \delta)I^2.$$

Il y a donc intérêt à ne pas employer des conducteurs massifs de grand diamètre pour les courants alternatifs.

Pour un accroissement de résistance donné, les diamètres des conducteurs sont en raison inverse des racines carrées des fréquences, c'est-à-dire que les sections des conducteurs sont en raison inverse des fréquences.

III. — *Capacité des lignes aériennes.*

Considérons un conducteur de rayon r et un conducteur cylindrique concentrique de rayon intérieur R séparés par de l'air sec. La longueur de chaque conducteur est l; r, R et l étant exprimés en centimètres, la capacité de la ligne est

$$(1) \qquad C = \frac{l}{2 \log_e \frac{R}{r}} \cdot \frac{1}{9 \times 10^5} \text{ microfarads,}$$

et la capacité d'un kilomètre de ligne

$$(2) \qquad C_{\text{kilom}} = \frac{1}{2 \log_e \frac{R}{r}} \cdot \frac{1}{9} \text{ microfarads.}$$

La capacité d'un fil horizontal de diamètre d et de longueur l par rapport à la terre (considérée comme un plan indéfini), et dont l'axe est à une distance D du sol, est

$$(3) \qquad C = \frac{l}{2 \log_e \frac{4D}{d}} \cdot \frac{1}{9 \times 10^5} \text{ microfarads,}$$

Digitized by Google

et la capacité d'un kilomètre de ligne

$$(4) \qquad C_{kilom} = \frac{1}{2 \log_e \frac{4D}{d}} \cdot \frac{1}{9} \text{ microfarads.}$$

Considérons encore une ligne formée de deux fils parallèles de longueur l, de diamètre d_1 et d_2, dont la distance entre axes est D. La capacité de la ligne est

$$(5) \qquad C = \frac{l}{2 \log_e \frac{4D^2}{d_1 d_2}} \cdot \frac{1}{9 \times 10^5} \text{ microfarads.}$$

Si les diamètres d_1 et d_2 sont égaux à d, on a

$$(6) \qquad C = \frac{l}{4 \log_e \frac{2D}{d}} \cdot \frac{1}{9 \times 10^5} \text{ microfarads,}$$

et la capacité kilométrique est

$$(7) \qquad C_{kilom} = \frac{1}{4 \log_e \frac{2D}{d}} \cdot \frac{1}{9} \text{ microfarads,}$$

ou, en adoptant les logarithmes vulgaires,

$$(8) \qquad C_{kilom} = \frac{1}{4 \times 2,3026 \log \frac{2D}{d}} \cdot \frac{1}{9} \text{ microfarads.}$$

En désignant par n la fréquence et par E la moyenne efficace de la tension, que nous supposons sinusoïdale, le courant de charge par kilomètre de ligne est

$$(9) \qquad I = 2\pi n CE = \frac{2\pi n E . 10^{-6}}{4 \times 2,3026 \log \frac{2D}{d} \times 9} \text{ ampères.}$$

Le courant de charge d'une ligne donnée est proportionnel à la fréquence et à la tension. Il croît encore directement avec la longueur de la ligne.

Nous avons calculé d'après la formule (9) le courant de

Digitized by Google

DIAMÈTRE des fils, en centim....	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
SECTION en millimètres carrés...	7,07	12,56	19,63	28,27	50,3	78,5
Distance entre axes en centim.	*Courant de charge en ampères, à la tension de 10000 volts et à la fréquence de 60 périodes par seconde.*					
25	0,0195	0,0217	0,0228	0,0237	0,0253	0,0268
40	0,0188	0,0198	0,0206	0,0214	0,0227	0,0239
60	0,0175	0,0184	0,0191	0,0198	0,0209	0,0219
90	0,0164	0,0172	0,0178	0,0184	0,0194	0,0205
120	»	0,0164	0,0170	0,0175	0,0184	0,0191
150	»	»	0,0164	0,0168	0,0177	0,0184
180	»	»	0,0160	0,0164	0,0172	0,0178
	Courant de charge en ampères, à la tension de 10000 volts et à la fréquence de 25 périodes par seconde.					
25	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0105	0,0112
40	0,0078	0,0082	0,0086	0,0089	0,0095	0,0100
60	0,0073	0,0076	0,0080	0,0082	0,0087	0,0091
90	0,0068	0,0072	0,0074	0,0076	0,0081	0,0085
120	»	0,0068	0,0070	0,0073	0,0076	0,0080
150	»	»	0,0068	0,0070	0,0074	0,0076
180	»	»	0,0066	0,0068	0,0072	0,0074

Digitized by Google

charge par kilomètre de ligne, engendré par une tension sinusoïdale de 10000 volts efficaces, pour différents diamètres de fil et pour différentes distances entre axes, pour les fréquences de 60 et de 25 périodes par seconde. Les résultats du calcul sont consignés dans le Tableau ci-contre.

Ce Tableau montre que le courant de charge ne joue qu'un rôle peu important, sauf pour des lignes très longues et pour des tensions très élevées, avec les fréquences usitées. Du reste, ce courant étant à angle droit avec le courant de travail, il devient moins appréciable par l'ampèremètre dès que la ligne débite une fraction notable de la charge normale.

Remarque. — Le rapport du courant de charge au courant de travail, pour une puissance réelle donnée, est proportionnel au carré de la tension de ligne.

Pertes par les isolateurs. — Des essais ont été effectués sur des isolateurs de verre à double cloche, portés par une broche de bois et ayant 135^{mm} de diamètre extérieur et 125^{mm} de hauteur. Deux fils fixés l'un aux isolateurs, l'autre aux broches de bois, étaient soumis à une tension alternative de 25000 volts, correspondant par conséquent à une tension de 50000 volts entre deux fils d'une ligne. La perte a été trouvée égale à environ 2 watts par isolateur.

En temps humide, les dérivations du courant sèchent la surface intérieure des isolateurs.

IV. — *Canalisations souterraines.*

Les câbles souterrains étant formés de conducteurs rapprochés ont une inductance inférieure à celle des lignes aériennes. Cependant l'inductance des câbles à conducteurs juxtaposés non concentriques est rarement négligeable. Si la section de chaque conducteur est grande, il faut tenir compte, en outre, de l'augmentation de résistance due à la localisation du courant alternatif, principalement dans les couches extérieures du métal.

Dans les câbles armés, les rubans d'acier donnent lieu à une perte supplémentaire.

Digitized by Google

Des essais effectués sur un câble à trois conducteurs tordus de 300^{mm^2} chacun, pour courant triphasé de 3500 volts, séparés par une isolation de 7^{mm} d'épaisseur, ont donné un facteur d'impédance, pour une fréquence de 50 périodes par seconde, de 2,1. C'est dire que, si une tension continue 2RI est nécessaire pour engendrer un courant continu I dans deux des trois conducteurs mis en court-circuit à l'une de leurs extrémités, il faut, pour obtenir un courant alternatif I dans ce même circuit, à la fréquence de 50 périodes par seconde, une tension alternative égale à

$$2ZI = 2(2,1.R)I.$$

La capacité des câbles souterrains est, en général, bien supérieure à celle des lignes aériennes :

1° Parce que les conducteurs sont beaucoup plus rapprochés;

2° Parce que le diélectrique des câbles possède une capacité inductive beaucoup plus élevée que celle de l'air.

La capacité des câbles à conducteurs juxtaposés est très notablement inférieure à celle des câbles concentriques, à isolation égale. Aussi préfère-t-on les premiers, afin de réduire autant que possible les effets de résonance nuisibles qui peuvent se produire par suite de la capacité dans les réseaux développés.

Les feeders Ferranti, à courant alternatif, reliant l'usine de Deptford à Londres [1], sont formés de deux tubes de cuivre concentriques, isolés entre eux par un ruban de papier imprégné de matière isolante. Le conducteur extérieur est recouvert de ce même isolant, et le câble est protégé par une enveloppe constituée par un tube de fer. Dans le feeder de $2 \times 177^{mm^2}$, l'épaisseur de l'isolant entre les deux conducteurs est $12^{mm},5$. L'isolant entre le conducteur extérieur et le tube de fer a une épaisseur de 4^{mm}. Le diamètre extérieur du conducteur intérieur est 21^{mm}. Le conducteur extérieur a un diamètre intérieur de 47^{mm}. La résistance kilométrique des deux brins est 0,2 ohm. La capacité électrostatique entre les deux conducteurs est 0,2 microfarad par kilomètre. La

---

[1] FLEMING, *The alternate current transformer*, t. II.

Digitized by Google

capacité entre le conducteur extérieur et le tube de fer est environ 10 fois plus grande. L'inductance est 179 microhenrys par kilomètre, et la résistance d'isolement entre les deux conducteurs 1 100 mégohms par kilomètre.

V. — *Rigidité électrostatique et capacité inductive.*

La rigidité électrostatique d'un diélectrique est la différence de potentiel nécessaire pour faire jaillir un arc entre deux conducteurs séparés par 1^{cm} d'épaisseur de cette substance.

Rigidité électrostatique de l'air. — Le Tableau ci-dessous, que nous empruntons au Formulaire de M. Hospitalier, en arrondissant les nombres, indique le nombre de kilovolts nécessaires pour amorcer un arc entre deux sphères métalliques de 1^{cm} de diamètre, en fonction de la distance de ces sphères.

TABLEAU I.

DISTANCE des deux sphères.	DIFFÉRENCE de potentiel.	DISTANCE des deux sphères.	DIFFÉRENCE de potentiel.	DISTANCE des deux sphères.	DIFFÉRENCE de potentiel.
mm	kilovolts	mm	kilovolts	mm	kilovolts
1	4,8	9	24,2	17	29,8
2	8,1	10	25	18	30,1
3	11,3	11	26,3	19	30,6
4	14,1	12	27	20	30,9
5	16,7	13	27,8	21	31,2
6	19,2	14	28,4	22	31,5
7	21,8	15	29		
8	22,8	16	29,4		

Le Tableau II indique les distances explosives entre deux fines pointes d'aiguille opposées, pour différentes moyennes efficaces de tensions sinusoïdales. Ce Tableau a été établi par le Comité de l'Institut américain chargé de fixer les règles pour les génératrices, les moteurs et les transformateurs en 1899.

Digitized by Google

TABLEAU II.

TENSION efficace entre les deux pointes d'aiguille.	DISTANCE explosive.	TENSION efficace entre les deux pointes d'aiguille.	DISTANCE explosive.
kilovolts	cm	kilovolts	cm
5	0,57	60	11,8
10	1,19	70	14,9
15	1,84	80	18,0
20	2,54	90	21,2
25	3,3	100	24,4
30	4,1	110	27,3
35	5,1	120	30,1
40	6,2	130	32,9
45	7,5	140	35,4
50	9,0	150	38,1

Le Tableau III a été établi dans l'hypothèse que la différence de potentiel nécessaire pour traverser un diélectrique solide ou liquide est proportionnelle à l'épaisseur de ce diélectrique et à un facteur dépendant de la nature de cette substance; ce facteur est la rigidité électrostatique que l'on mesure en kilovolts par centimètre [1].

TABLEAU III.

DÉSIGNATION DU DIÉLECTRIQUE.	KILOVOLTS par centimètre.	
	(Macfarlane).	(Steinmetz).
Huile de térébenthine	94	64
Huile de paraffine	87	»
Huile d'olive	82	»
Paraffine fondue	56	81
Paraffine solide	139	»
Pétrole	50	»
Papier paraffiné	360	339
Papier enduit de cire jaune	540	»
Soufre cristallisé (Threlfall)	33	

(1) Formulaire E. Hospitalier.

Digitized by Google

Pour l'air, M. Steinmetz a trouvé 16 kilovolts par centimètre, la mesure ayant porté sur une épaisseur de 5^{mm}.

Pour l'air, l'acide carbonique, l'oxygène et le gaz de houille, mesure ayant été faite sur une épaisseur de 5^{mm}, Macfar-e a trouvé une rigidité d'environ 23 kilovolts par centi-re.

T. Gray a mesuré la rigidité électrostatique de divers di ctriques entre deux surfaces sphériques de grand diame , et sur de faibles épaisseurs. Il a admis que la tension exp ive était proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique. Les sultats de ses recherches sont consignés dans le Table IV.

TABLEAU IV.

IGNATION DU DIÉLECTRIQUE.	KILOVOLTS par centimètre.
Verre....	285
Ébonite...	538
Caoutchouc	476
Mica.....	2000
Micanite...	4000
Papiers para , suivant nature.....	300 à 450
Papier buvar affiné.....	150
Huile de lin..	83
Huile de grais	48
Air à $0^{cm},2$ d'é eur entre plateaux	57
Air à $1^{cm},6$ d'é eur entre plateaux	27

Le Tableau V dique la capacité inductive spécifique, ou capacité diélectr ue, de diverses substances, d'après M. J. Rabinowicz (1 . Nous y avons ajouté la capacité inductive écifique de résine, de la cire jaune, du soufre et de la me-laqu

TABLEAU V.

DÉSIGNATION DE LA SUBSTANCE.	CAPACITÉ inductive spécifique.
Air à 760^{mm} de mercure et 0°	1
Air à 1^{mm} de mercure	0,94
Pétrole	1,6
Paraffine	1,95 à 2
Caoutchouc	2,8 à 3,6
Gutta-percha	4 à 4,2
Verre	4,6
Mica	5,0
Eau	6,3
Résine	1,77
Cire jaune	1,86
Soufre	1,93
Gomme-laque	1,95

CONSTRUCTION DES CANALISATIONS.

Actuellement les canalisations à très haute tension, au-dessus de 4000 ou 5000 volts, sont en général aériennes. Ce fait tient au prix très élevé des câbles isolés pour très haute tension. Le coût de l'isolation, du plomb et de l'armature se fait sentir principalement sur les câbles de faible section. Pour les réseaux étendus, l'isolation doit être encore renforcée, en raison des dangers de perforation que fait courir à l'isolant la capacité de ces réseaux.

D'après M. J.-G. White, la conduite des Chutes du Niagara à Buffalo, d'une longueur d'environ 43^{km}, établie pour transporter 20000 chevaux, aurait coûté un million et quart de dollars, soit environ 6 millions et demi de francs, si elle avait été construite souterrainement avec douze câbles de 175$^{mm^2}$ de section, tandis que le prix de la ligne aérienne formée de douze câbles de même section que les précédents est évalué à environ le tiers de cette somme.

Digitized by Google

Les jonctions des divers tronçons, ainsi que les dérivations sur les câbles souterrains, exigent, principalement dans le cas de très haute tension, un soin spécial dans leur exécution. Il est en particulier très important que les boîtes de jonction ou de dérivation soient assises sur un terrain solide, de manière à ne pas être exposées à des déplacements après leur pose.

1. — *Canalisations souterraines.*

Cependant les canalisations souterraines n'ont pas été complètement bannies des installations à très haute tension.

Ainsi, la ligne de Niagara-Falls à Buffalo, transmettant un courant triphasé de 11000 volts, devient souterraine sur une longueur d'environ 1200^{m} à son arrivée dans la ville de Buffalo. Ce tronçon est formé de trois câbles de 175^{mm^2} de section, isolés au caoutchouc, sous plomb, et logés dans des conduits en briques vernissées. On a prévu l'installation de douze câbles semblables.

D'après M. White, ces câbles sont essayés à une tension de 40000 volts, et sont garantis pendant 5 ans pour une tension de fonctionnement jusqu'à 25000 volts. M. Lincoln estime, d'après ses essais, que la tension nécessaire pour percer ces câbles est voisine de 80000 volts.

La ligne à courant triphasé de 10000 volts desservant la ville de Hartford comporte également un tronçon souterrain d'environ 900^{m} de longueur.

La Société française des Câbles électriques système Berthoud-Borel avait exposé à Paris, en 1900, un câble à courant triphasé sous plomb, formé de trois conducteurs de 50^{mm^2} juxtaposés et tordus, qui fonctionnait sous la tension de 30000 volts. L'isolant de ce câble est constitué essentiellement par du papier imprégné d'une matière résineuse spéciale. L'épaisseur de l'isolant entre deux conducteurs est d'environ 17^{mm}.

Lorsqu'on conduit un courant alternatif ou polyphasé au moyen de plusieurs conducteurs séparés, il faut avoir soin de supprimer les armatures de fer. Dans une installation, l'auteur avait fait exécuter la connexion d'une machine à courant triphasé de 150 kilowatts, 3×440 ampères, 200 volts, 50 pé-

Digitized by Google

riodes par seconde, avec son Tableau de réglage, au moyen de trois câbles de 250$^{mm^2}$, sous plomb. Le câble sous plomb disponible étant de longueur insuffisante, le monteur prit pour l'un des trois conducteurs un câble armé, type Siemens, de même section. Ce conducteur présenta un fort échauffement qui fit fondre l'enduit extérieur de brai, quoique le courant ne dépassât que momentanément l'intensité de 300 ampères, les deux conducteurs sous plomb seulement ne manifestant du reste aucun échauffement anormal.

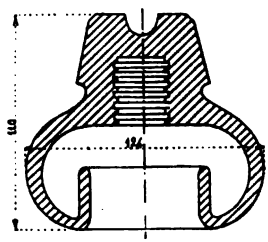
II. — *Canalisations aériennes.*

Isolateurs. — L'isolation des lignes aériennes pour très haute tension exigea l'établissement d'isolateurs offrant une grande résistance au passage du courant et ne se laissant pas percer par les hautes tensions employées.

La porcelaine, parfaitement vitrifiée par la cuisson, possède une grande résistivité. La surface, bien vernissée, est très peu hygroscopique. Cependant, la résistance de la surface de la porcelaine diminue en temps humide ou pluvieux.

On a augmenté la résistance superficielle en temps humide

Fig. 115.



en ménageant à l'intérieur de l'isolateur une ou plusieurs rigoles que l'on remplit d'une huile isolante plus légère que l'eau, de l'huile lourde de pétrole, par exemple. Si, en temps humide, des condensations viennent à se produire sur la surface de l'isolateur, et que des gouttelettes d'eau se déposent sur l'huile qu'il renferme, ces gouttelettes tombent au

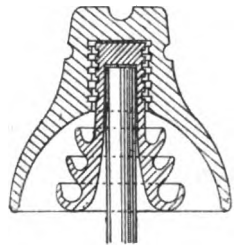
Digitized by Google

fond de la rigole, de telle sorte que la surface de l'huile offre toujours une très grande résistance au passage du courant. La couche d'huile étant du reste protégée par la cloche extérieure de l'isolateur, ces condensations n'ont qu'une très faible importance.

La figure 115 représente un isolateur de porcelaine, à simple cloche, à huile, d'un type analogue à ceux employés dans le transport d'énergie électrique de Lauffen aux terrains de l'Exposition de Francfort, en 1891. La rigole à huile est formée par un retroussement intérieur de la cloche. La tension du courant triphasé était d'environ 15000 volts.

La figure 116 représente un second type d'isolateur de por-

Fig. 116.



celaine, à huile, employé sur une partie de la même ligne. Cet isolateur se compose de deux parties : l'une, intérieure, porte sur sa surface extérieure trois rigoles à huile ; la seconde pièce, extérieure, scellée sur la première, forme cloche protectrice et porte le fil de ligne.

On peut encore protéger ces isolateurs contre la malveillance en les recouvrant d'une cuirasse métallique.

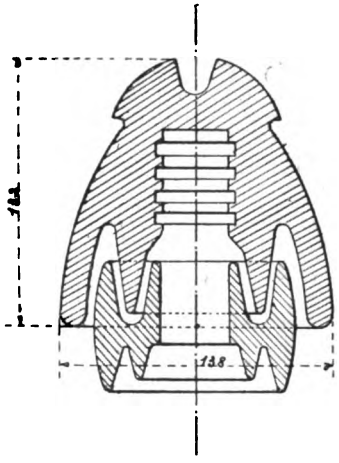
L'emploi de l'huile dans les isolateurs présente l'inconvénient que la poussière et les insectes viennent souiller le liquide. Le nettoyage et le remplissage des rigoles s'imposent donc de temps à autre. Cette opération n'est pas très aisée avec les deux types d'isolateurs que nous venons de décrire.

La figure 117 montre, à l'échelle d'un quart environ, un isolateur à huile, en deux pièces, étudié par le Professeur Mengarini pour la ligne de transport d'énergie de Tivoli-

Digitized by Google

Rome par courant alternatif de 6000 volts environ (1). La partie supérieure est un isolateur ordinaire, de porcelaine, à double cloche. La pièce inférieure, également de porcelaine, porte une rigole qu'on remplit d'huile dans laquelle plonge la cloche intérieure de l'isolateur. Ce dispositif rend impossible, ou tout au moins très difficile, la pénétration des insectes dans le compartiment intérieur. Cette pièce inférieure est maintenue par une goupille de fer traversant le support d'isolateur et peut être aisément abaissée pour le nettoyage et le remplissage de la rigole à huile.

Fig. 117.



La ligne à courant alternatif de 6500 volts desservant Alcoy et Gandia (Espagne), installée par la maison Siemens Bros, est portée également par des isolateurs dont les cloches plongent dans l'huile.

Le nettoyage et le remplissage des rigoles à huile constituent un assujettissement qui peut devenir très sérieux

(1) D'après *The Electrical Review* du 7 mai 1897, la self-induction dans la ligne, d'une longueur d'environ 29 kilomètres, exige même de porter la tension à l'origine jusqu'à 7000 volts. Si l'inductance de la ligne était nulle, la tension à l'origine serait 5000 volts.

Digitized by Google

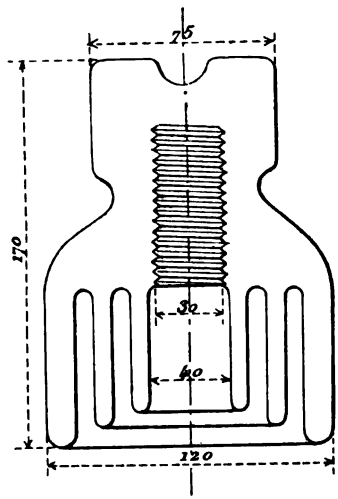
lorsque la ligne a une grande longueur et est formée d'un grand nombre de conducteurs. Ce travail exige évidemment l'interruption du fonctionnement de la ligne, ou tout au moins d'une partie de la ligne, si celle-ci est multiple.

D'autre part, si l'huile accroît notablement la résistance d'isolement de la surface de l'isolateur en temps humide, elle ne s'oppose pas à la perforation de l'isolateur.

Ces considérations ont amené la plupart des électriciens à abandonner l'emploi de l'huile dans les isolateurs. L'isolement superficiel a été assuré en augmentant le développement de la surface, tant en accroissant les dimensions de l'isolateur qu'en multipliant le nombre de cloches. La résistance de la porcelaine elle-même à la perforation par l'étincelle a été accrue en cuisant fortement l'isolateur, de manière à vitrifier complètement sa masse.

La figure 118 est la coupe d'un isolateur de porcelaine, à

Fig. 118.



triple cloche, pour 12000 volts; il a 120^{mm} de diamètre et 170^{mm} de hauteur. Le fil est logé dans une cannelure.

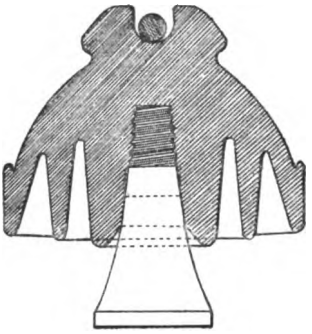
La figure 119 représente un isolateur de porcelaine, à trois cloches, fabriqué par *Imperial Porcelain Works,* de Trenton,

Digitized by Google

pour la ligne à courant triphasé de 11 000 volts de Niagara-Falls à Buffalo.

Cet isolateur a une hauteur d'environ 140^{mm} et pèse approximativement $4^{kg},5$. La cloche extérieure porte à sa partie inférieure une petite rigole échancrée aux extrémités d'un diamètre, ayant pour but de déverser l'eau en dehors

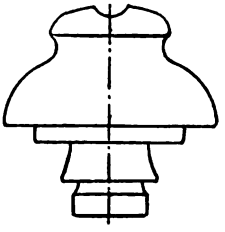
Fig. 119.



de la traverse sur laquelle est fixé l'isolateur. Celui-ci est vissé sur un support de caroubier bouilli dans la paraffine. On obtient de la sorte une isolation supplémentaire. Un prolongement du support de bois pénètre dans la traverse du poteau, ou bien encore une tige de fer ou d'acier vissée dans le support de bois passe dans la traverse et porte à son extrémité inférieure une rondelle et un écrou.

Les figures 120 et 121 représentent deux isolateurs fa-

Fig. 120.

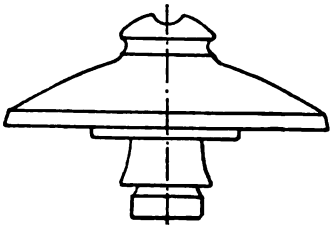


briqués par M. Fred.-M. Locke pour des tensions de 25 000 et

Digitized by Google

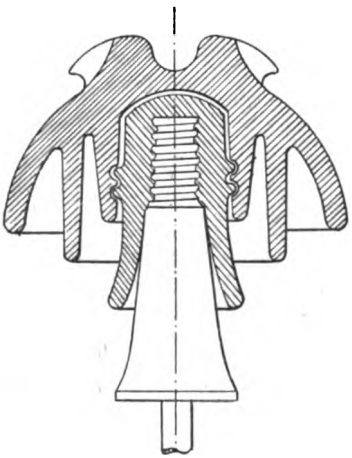
de 40000 volts. La figure 122 indique le mode de construction de ces isolateurs. Ils se composent de deux pièces : l'une,

Fig. 121.



extérieure, de porcelaine, porte trois cloches; elle vient se visser ou se sceller sur la pièce intérieure de verre ou de

Fig. 122.



porcelaine. La tige de ces isolateurs est de caroubier ou de chêne bouilli dans la paraffine.

L'avantage attribué à ce mode de construction des isolateurs en deux parties est que l'on peut donner à chaque pièce une épaisseur moindre et plus uniforme, permettant d'obtenir

Digitized by Google

une cuisson plus complète et, par conséquent, une vitrification parfaite de la matière.

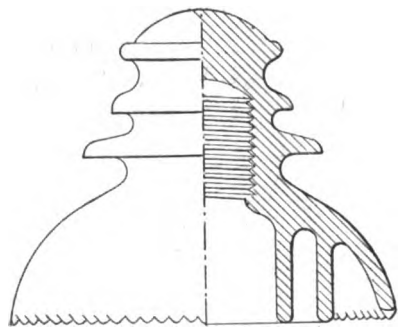
L'emploi du verre a été préconisé pour la pièce intérieure de l'isolateur, en raison de sa résistance à la perforation par les étincelles, grâce à sa parfaite vitrification, tandis que la porcelaine constituant la pièce extérieure oppose une grande résistance de surface au passage du courant.

On a même établi des isolateurs complètement en verre. Mais le recuit de ces isolateurs de grandes dimensions est une opération délicate. En outre, la résistance mécanique du verre est inférieure à celle de la porcelaine, et la surface du verre est plus hygroscopique que celle de la porcelaine.

La *Hemingray Glass Company* fabrique des isolateurs de verre, désignés sous le nom de *type Provo*, pour 10000, 25000 et 40000 volts. Ces isolateurs ont trois cloches. Le fil est assujetti latéralement dans une rainure circulaire. Le bord de la cloche extérieure est dentelé pour faciliter l'écoulement de l'eau.

La figure 123 représente le type n° 3 établi pour une ten-

Fig. 123.



sion de fonctionnement de 40000 volts, fourni à la *Telluride Power Transmission Company*. Cet isolateur a deux larmiers supérieurs. Son diamètre est de 176^{mm} et sa hauteur de 140^{mm}.

Le type n° 2, pour 25000 volts, a un seul larmier supérieur. Il a 140^{mm} de diamètre et 120^{mm} de hauteur.

Le type n° 1, pour 10000 volts, n'a pas de larmier supé-

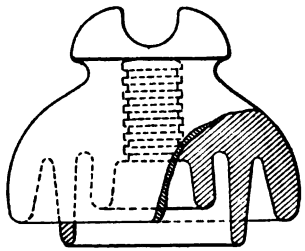
Digitized by Google

rieur. Son diamètre est de 108mm, et sa hauteur de 95mm.

Les isolateurs de verre offrent sur ceux de porcelaine l'avantage de ne pas exiger d'essai, les défauts du verre se reconnaissant à l'œil même.

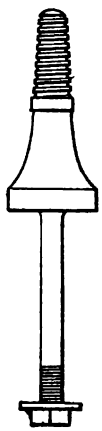
La figure 124 représente un isolateur de verre, à triple

Fig. 124.



cloche, pour 20000 volts, fabriqué par M. Locke. Cet isolateur a 140mm de diamètre et 115mm de hauteur. Il est vissé

Fig. 125.



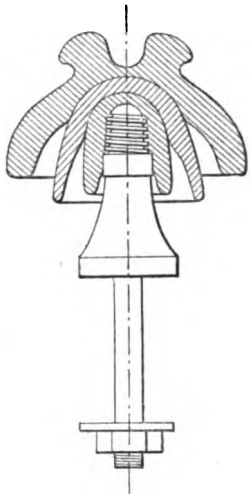
sur un support de porcelaine dans lequel est scellé un goujon d'acier (*fig.* 125).

M. Locke a encore établi des isolateurs comme l'indique

Digitized by Google

la figure 126. L'isolateur est formé de trois cloches cuites d'abord séparément, puis soudées ensemble par une dernière cuisson; il est vissé sur un support de porcelaine fixé

Fig. 126.



à un goujon d'acier. Le support de porcelaine offre plus de sécurité que le support de bois, qui se carbonise parfois.

Dans les installations peu importantes comportant des génératrices de faible puissance, un court-circuit sur la ligne, ou seulement un défaut d'isolement, sont décelés à l'usine même par le fonctionnement d'un interrupteur automatique ou par la fusion d'un plomb de sûreté. Si, au contraire, l'usine comporte des génératrices très puissantes, la ligne peut présenter de graves défauts sans que ceux-ci soient signalés à la station. M. J.-G. White rapporte qu'au cours d'un essai de fonctionnement de la ligne de Niagara-Falls à Buffalo, pourvue d'isolateurs provisoires les meilleurs connus à cette époque, on trouva que les extrémités de cinq traverses horizontales de bois de la ligne avaient été complètement carbonisées par le passage du courant sans

Digitized by Google

qu'aucune anomalie se fût manifestée à l'usine. Celle-ci est pourvue de génératrices de 5000 chevaux.

Il est donc très utile d'essayer tous les isolateurs avant leur mise en place, et de rejeter tous ceux qui ne satisfont pas aux diverses épreuves.

Dans un lot d'isolateurs on peut d'abord se rendre compte de la qualité de la porcelaine en prenant au hasard quelques échantillons que l'on brise, et sur la cassure desquels on trace quelques traits avec de l'encre rouge, par exemple. Si la porcelaine est parfaitement vitrifiée et, par suite, non poreuse, les traits d'encre ne sont pas embus, et un lavage les fait aisément disparaître. La puissance isolatrice de la porcelaine dépend, en effet, bien plus de la perfection de sa vitrification que de son épaisseur. C'est ainsi que, d'après M. J.-G. White, une mince tasse à thé supporta une tension de 60000 volts, tandis qu'une pièce de porcelaine grossière de 50^{mm} environ d'épaisseur fut percée à 20000 volts. Lorsqu'on essaie de percer un isolateur de verre en le soumettant à une tension croissante, on arrive, en général, à déterminer un arc autour de l'isolateur avant de le percer.

M. Lincoln a opéré de la façon suivante pour essayer les isolateurs destinés à la ligne de Niagara-Falls à Buffalo, à 11000 volts : les isolateurs étaient placés par vingtaines, la tête en bas, dans une cuvette de tôle contenant une couche d'eau salée de 25^{mm} à 50^{mm} d'épaisseur. On versait un peu d'eau salée dans chaque trou d'isolateur destiné à recevoir le support, et l'on y plongeait une tige métallique. Toutes ces tiges étant reliées à l'une des bornes d'un transformateur donnant 40000 volts, dont l'autre borne était connectée à la cuvette de fer, on lançait le courant primaire. Lorsqu'un isolateur se perce, on aperçoit une série d'étincelles jaunes. Le sodium a surtout l'avantage de colorer ces étincelles et, par suite, de les rendre plus visibles.

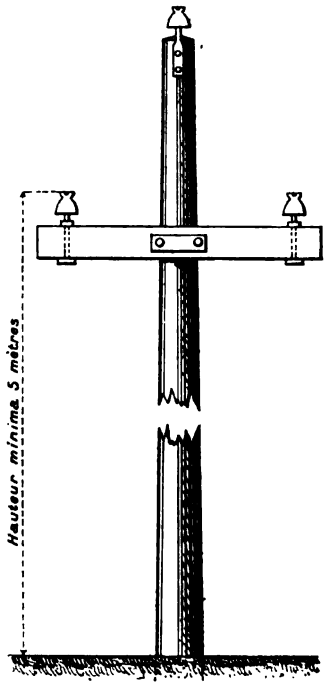
D'après M. J.-G. White, l'isolement de la ligne aérienne de Niagara-Falls à Buffalo, à 11000 volts, de 42^{km} de longueur, mesuré entre l'un quelconque des conducteurs et la terre, est de 0,25 mégohm à 0,30 mégohm en temps de pluie, et de 1 mégohm en temps sec, soit environ de 10,5 mégohms à 42 mégohms par kilomètre.

Digitized by Google

Exemples de lignes aériennes.

La ligne de transport d'énergie électrique de Lauffen à l'Exposition de Francfort, en 1891, à courant triphasé d'environ 15000 volts, 40 périodes par seconde, avait une longueur de 175^{km}. Les poteaux de bois (*fig.* 127), espacés d'en-

Fig. 127.



viron 60^{m}, portaient une traverse boulonnée, également de bois, aux extrémités de laquelle étaient fixés deux isolateurs à huile, le troisième isolateur étant tirefonné sur le sommet du poteau. Les trois fils de cuivre avaient 4^{mm} de diamètre.

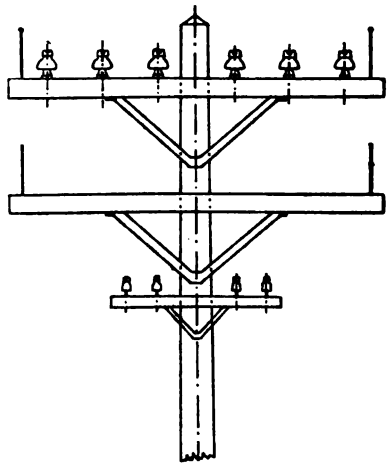
Lorsque la transmission comporte plusieurs lignes, on peut

Digitized by Google

les monter sur une ou plusieurs traverses horizontales fixées au poteau.

Le transport d'énergie de Niagara-Falls à Buffalo, à courant triphasé de 11000 volts, 25 périodes par seconde, est prévu pour quatre lignes formées chacune de trois câbles de 175^{mm^2} de section. Chaque poteau (*fig.* 128) est muni de

Fig. 128.



deux traverses principales, de bois, de $3^m,60$ de longueur et de $0^m,13$ de largeur sur $0^m,15$ de hauteur. Une petite traverse inférieure porte les lignes téléphoniques. Les poteaux, de cèdre blanc, ont $0^m,20$ de diamètre au sommet et $0^m,46$ de diamètre à la base. Leur longueur normale est $10^m,50$, et leur écartement 23^m environ. Ils sont encastrés dans du béton.

Chaque bras de traverse est réservé à une ligne. Les extrémités des traverses sont munies d'un crochet de fer empêchant la chute d'un conducteur en cas de rupture d'un isolateur. Les crochets de la traverse supérieure portent un fil de fer à pointes formant parafoudre, et relié à la terre tous les cinq poteaux.

La distance de transport est 43^{km} environ, dont 1200^m sont souterrains.

Digitized by Google

Depuis sa construction cette ligne a subi d'importantes modifications. La tension de 11000 volts a été portée à 22000 volts en montant en série les deux moitiés de l'enroulement secondaire des transformateurs, primitivement en quantité. La ligne étant destinée à transporter 12000 kilowatts, la station réceptrice comporte six transformateurs de 2250 kilowatts réduisant la tension à 11000 volts.

On a reconnu tout d'abord que les fils de fer parafoudres se rompaient parfois en occasionnant des courts-circuits, et étaient par suite plus nuisibles qu'utiles. On les a donc supprimés.

On a en outre constaté qu'un grand nombre des courts-circuits que l'on observait sur la ligne, dont les fils étaient distants de $0^m,45$, étaient produits par des morceaux de fil de fer que des enfants jetaient sur les câbles; ces corps amorçaient entre les conducteurs des arcs qui persistaient et voyageaient le long de la ligne jusqu'à ce que les coupe-circuits de l'usine eussent fonctionné. On supprima ces accident en plaçant les conducteurs à $0^m,90$ d'écartement et en les disposant suivant un triangle équilatéral.

Dans l'installation actuelle, les poteaux, distants de 27^m, portent deux traverses horizontales qui supportent deux lignes disposées de part et d'autre des poteaux et formées chacune de trois câbles de cuivre nu de 175^{mm^2} de section placés aux sommets d'un triangle équilatéral de $0^m,90$ de côté, la traverse supérieure recevant quatre isolateurs, et la traverse inférieure deux isolateurs. La ligne est transposée cinq fois sur sa longueur, à l'effet d'égaliser et de réduire au minimum la chute de tension par inductance.

Pour parer à tout accident, on construit une troisième ligne, de secours, suivant un tracé différent de celui de la ligne principale.

La transmission de puissance Eichdorf-Grünberg (Silésie) par courant triphasé de 10000 volts, 50 périodes par seconde, a été installée par la maison Siemens et Halske [1]. La ligne,

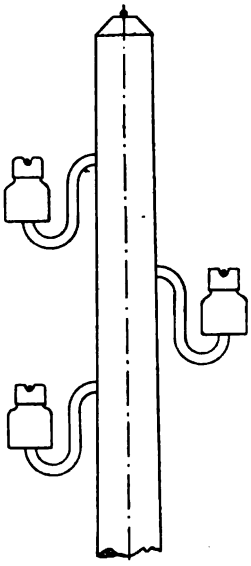
---

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift* du 5 novembre 1896.

Digitized by Google

de 25^{km} de longueur, est formée de trois fils de cuivre de 35^{mm^2} de section, portés par des isolateurs de porcelaine à trois cloches, d'environ 115^{mm} de diamètre et de 170^{mm} de hauteur. Les supports d'isolateurs (*fig.* 129) sont fixés directement

Fig. 129.



sur les poteaux; deux isolateurs sont disposés d'un côté du poteau, le troisième de l'autre côté. Les poteaux ont $0^m,18$ de diamètre au sommet; leur longueur totale est 14^m, dont 2^m à $2^m,50$ sont placés en terre. Ils sont espacés de 40^m.

Les trois fils sont disposés aux sommets d'un triangle équilatéral de 60^{cm} de côté. Le sommet des poteaux porte un fil de fer à pointes relié à la terre tous les six poteaux et formant parafoudre. La ligne est du reste protégée par une série de parafoudres à cornes.

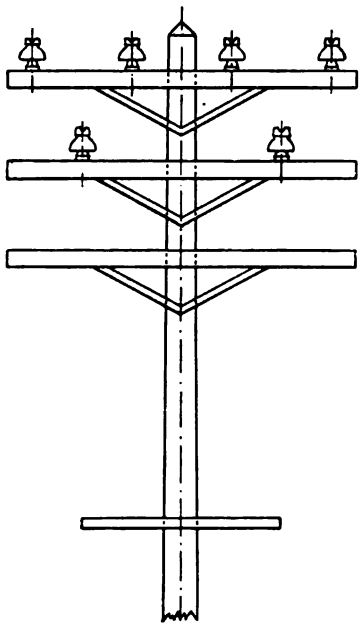
La ligne desservant la ville de Fresno (Californie) a une longueur d'environ 56^{km} (1). La puissance est transmise sous

(1) *The Electrical Review* des 16 et 23 juillet 1897.

Digitized by Google

forme de courant triphasé de 11200 volts, à la fréquence de 60 périodes par seconde. La ligne est double, formée de 2×3 fils de cuivre de 27^{mm^2} de section. Les poteaux de bois sont à section carrée de 15^{cm} de côté au sommet et de 25^{cm} à la base. Leur écartement normal est de 36^m, et leur hauteur varie de $10^m,50$ à 12^m, suivant les localités traversées. Ils portent en général deux traverses horizontales de $2^m,10$ de

Fig. 130.



longueur, distantes d'environ 53^{cm}. Chaque ligne est formée de trois fils placés d'un même côté du poteau. Comme le montre la figure 130, deux des fils d'un circuit sont portés par la traverse supérieure, le troisième fil étant monté sur la traverse de dessous. Les trois fils de ligne sont disposés aux sommets d'un triangle équilatéral d'environ 61^{cm} de côté. Pour éviter les effets d'induction sur les lignes voisines, les fils sont transposés tous les quarante poteaux. Les isolateurs ont trois cloches.

Digitized by Google

Sur un certain parcours, les poteaux portent une troisième traverse horizontale réservée aux lignes de service de la Compagnie.

Une petite traverse d'environ $1^{m},22$ de longueur porte la ligne téléphonique. Cette traverse est placée à $1^{m},58$ au-dessous de la traverse inférieure portant les conducteurs à haute tension. Les fils du téléphone sont transposés tous les cinq poteaux.

La transmission d'énergie de Ogden à Salt Lake City (Utah) a une longueur de 60^{km} environ. La puissance de 3000 chevaux électriques à l'arrivée est transmise sous forme de courant triphasé de 16000 volts à la fréquence de 60 périodes par seconde, au moyen de deux lignes à trois fils de 42^{mm^2} de section. Les poteaux de cèdre ont des longueurs de 9^{m}, 12^{m}, 15^{m} et 21^{m}. Leur diamètre au sommet varie de 23^{cm} à 25^{cm}. Il y a environ trente-deux poteaux par kilomètre. Ils portent chacun deux traverses horizontales de bois. La traverse supérieure supporte deux fils distants de $1^{m},20$; la traverse inférieure reçoit quatre fils espacés deux à deux de 60^{cm}. Les trois conducteurs situés d'un même côté du poteau forment une ligne.

Les fils à haute tension sont transposés tous les 800^{m} environ. A $1^{m},60$ au-dessous de la traverse inférieure se trouve une petite traverse portant les deux fils du téléphone. Ceux-ci sont transposés tous les quatre poteaux.

On a prévu l'augmentation de la puissance transmise par la ligne en portant, quand il sera nécessaire, la tension aux bornes de départ de la ligne à 27000 volts.

La disposition consistant à placer les trois conducteurs d'une ligne à courant triphasé aux sommets d'un triangle équilatéral rend égales les inductances des trois sections. En outre, chaque conducteur n'exerce aucune action inductrice sur la section formée par les deux autres conducteurs.

Lorsqu'on dispose les trois conducteurs dans un même plan, pour un même écartement minimum entre deux fils, on accroît l'inductance de la section formée par les deux conducteurs extrêmes.

Digitized by Google

La ville de Butte (Amérique) est alimentée par une usine génératrice installée sur le Missouri, à une distance de 113^{km}, développant une puissance de 12000 chevaux sous forme de courant triphasé à 50000 volts, à la fréquence de 60 périodes par seconde. Il y a deux lignes primaires parallèles, distantes de 15^{m} à 30^{m}, composées chacune de trois conducteurs disposés aux sommets d'un triangle équilatéral d'environ 2^{m} de côté.

Chaque poteau porte une traverse de bois, de 14^{cm} d'équarrissage et de $2^{m},40$ de longueur, renforcée par deux contrefiches de bois dur de $7^{cm},5$ d'équarrissage. Chaque extrémité de la traverse porte un isolateur, le troisième étant fixé au sommet et dans l'axe du poteau. Ces isolateurs sont vissés sur une forte broche de bois conique prolongée par une tige cylindrique qui s'engage dans la traverse, ou dans le poteau, où elle est goupillée au moyen d'un boulon transversal. Le bord inférieur de l'isolateur est à 23^{cm} environ au-dessus de la traverse.

On emploie quelquefois, pour les lignes aériennes, l'aluminium à la place du cuivre.

A la teneur de 99 pour 100, l'aluminium a une conductibilité, pour une même section, égale à 0,60 de celle du cuivre. La résistance d'un fil d'aluminium de 1^{mm^2} de section et de 1^{km} de long, à la température de 15°, est donc de 29 ohms.

Son poids spécifique est $2^{kg},7$, soit environ 3,3 fois moindre que celui du cuivre, qui est égal à $8^{kg},9$.

La charge de rupture par millimètre carré du métal étiré est 27^{kg}. Celle du cuivre varie entre 24^{kg} et 40^{kg}.

Le coefficient d'allongement linéaire de l'aluminium pour 100° est 0,0023. Le prix du métal étiré est d'environ $3^{fr},70$.

A conductibilité égale, les poids d'une ligne d'aluminium et d'une ligne de cuivre sont dans le rapport

$$\frac{\frac{1}{0,60} \times 2,7}{1 \times 8,9} = 0,506.$$

La ligne d'aluminium pèse donc environ la moitié du poids de la ligne de cuivre.

Digitized by Google

Le prix de la ligne d'aluminium est à celui de la ligne de cuivre dans le rapport

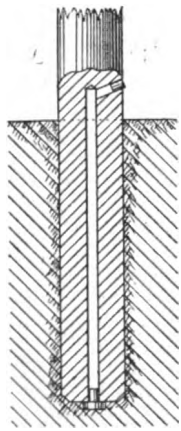
$$\frac{3,7 \times 0,506}{2,20 \times 1} = 0,853.$$

L'aluminium fond entre 625° et 700° suivant sa pureté. On assemble les divers tronçons au moyen de jonctions mécaniques. Le meilleur procédé est le suivant : on croise les deux fils à jonctionner sur une longueur de 200^{mm} à 250^{mm}, et l'on recouvre la partie commune d'un fourreau d'aluminium, puis, au moyen de deux pinces, on tord plusieurs fois l'ensemble.

Les poteaux de bois sont les plus usités. Ils sont moins coûteux que ceux de fer et, en outre, ils constituent une petite isolation supplémentaire entre les différents conducteurs et par rapport à la terre.

On augmente la durée des poteaux de bois en les injectant.

Fig. 131.



Cette préparation est surtout utile pour la partie encastrée dans le sol. On emploie à cet effet le sulfate de cuivre, la créosote, etc. Un bon procédé de préservation contre la pour-

Digitized by Google

riture consiste à percer dans l'axe de la base du poteau [1], sur un peu plus que la longueur enterrée, un trou dans lequel on verse de temps à autre de la créosote (*fig.* 131).

On emploie aussi des poteaux formés de tubes d'acier et des poteaux de fer composés.

Lorsqu'on a de grandes portées à franchir, on emploie des pylônes de fer.

Dans les calculs de résistance mécanique de la ligne des chutes du Niagara à Buffalo, on a admis que les câbles de 175^{mm^2} de section pouvaient se recouvrir d'une couche de glace d'environ 13^{mm} d'épaisseur. On a compté que l'effort du vent sur les poteaux, les traverses, les fils, etc., pouvait atteindre 150^{kg} par mètre carré. On avait posé en principe que les poteaux ne devaient rompre que sous un effort triple de celui résultant de ces hypothèses.

RÈGLES RELATIVES AUX CANALISATIONS.

En France, les canalisations d'énergie électrique sont soumises de la part de l'Administration à un certain nombre de règles dont les principales sont les suivantes :

Un courant continu de tension supérieure à 600 volts, ou alternatif de tension efficace supérieure à 120 volts, est réputé comme courant de haute tension.

L'emploi de la terre comme partie de circuit est interdit.

1° *Canalisations aériennes.*

Les conducteurs et leurs supports doivent présenter une résistance mécanique suffisante pour qu'il n'y ait aucun danger de rupture.

Les isolateurs à simple cloche et les isolateurs à huile sont considérés comme insuffisants pour la haute tension. La distance entre deux isolateurs consécutifs ne peut pas être supérieure à 100^{m}, sauf exception motivée.

---

[1] Procédé de M. Liebau.

Digitized by Google

La hauteur des conducteurs au-dessus du sol est définie dans chaque cas par les services de voirie intéressés. L'arrêté du Ministre des Travaux publics, en date du 1er septembre 1893, imposait une hauteur minimum de 6m au-dessus du sol pour les conducteurs suivant une voie publique, de 8m dans la traversée de ces voies, et de 17m au-dessus des plus hautes eaux des rivières et canaux navigables.

Dans le cas de courant à haute tension, les poteaux sont munis, à partir de 2m au-dessus du sol, et sur une hauteur de 0m,50, d'un dispositif empêchant d'atteindre les conducteurs. On emploie souvent à cet effet un fil ronce que l'on enroule en spirale autour du poteau, ou des ceintures garnies de pointes de fer.

Les appuis d'angle portent un dispositif empêchant le conducteur de tomber sur le sol dans le cas où il viendrait à abandonner l'isolateur. Dans le cas où le poteau et le support d'isolateur ne satisfont pas à cette condition, on constitue cette garde au moyen d'un fer coudé en U.

Aux traversées des voies publiques, des rivières ou canaux navigables, on établit un filet de protection sous les canalisations à haute tension, à moins qu'un dispositif rendant le conducteur inoffensif en cas de rupture n'ait été agréé par l'Administration.

Dans la traversée des lieux habités, les conducteurs sont placés à 1m au moins des façades des maisons, et à 0m,50 au moins au-dessus des fenêtres les plus élevées, et en tout cas hors de la portée des habitants. S'ils passent au-dessus d'un toit, ils doivent en être à une distance d'au moins 2m,50.

Les branchements particuliers sont protégés dans toutes leurs parties où ils sont à la portée des personnes.

Lorsque des conducteurs d'énergie suivent parallèlement une ligne télégraphique ou téléphonique, ils en sont écartés d'au moins 1m dans le cas de courant de basse tension, et d'au moins 2m dans le cas de courant de haute tension, sauf si la ligne d'énergie est fixée sur tout le parcours, auquel cas la distance est réduite à 1m.

Aux croisements d'une ligne à haute tension avec une ligne télégraphique ou téléphonique, on emploie le dispositif mécanique de garde.

Digitized by Google

En principe, l'isolement kilométrique de l'ensemble des conducteurs aériens doit être au moins de 5 mégohms pour les canalisations à haute tension et de 1 mégohm pour les canalisations à basse tension.

2° *Conducteurs souterrains.*

Les conducteurs souterrains d'énergie électrique doivent être protégés mécaniquement contre les avaries que pourraient leur occasionner les tassements des terres, le contact des corps durs ou le choc des outils en cas de fouille.

Lorsque des canalisations d'énergie passent sur des ouvrages métalliques, l'Administration peut imposer l'établissement de boîtes de coupure permettant de vérifier l'isolement du tronçon ainsi constitué.

Si un conducteur d'énergie logé dans un caniveau ou un tuyau passe dans le voisinage d'une conduite de gaz, la ventilation de cette gaine doit être assurée.

Si des câbles d'énergie électrique suivent parallèlement une ligne télégraphique ou téléphonique, une distance d'au moins 1^m en projection horizontale doit exister entre ces conducteurs et la ligne télégraphique ou téléphonique. Aux points de croisement, les conducteurs d'énergie électrique sont placés à une distance minimum de $0^m,50$ des conduites télégraphiques ou téléphoniques, à moins que la canalisation ne présente en ces points les mêmes garanties, aux points de vue de la sécurité publique, de l'induction et des dérivations, que les câbles concentriques ou cordés, sous plomb et armés.

Les conducteurs d'énergie électrique formant branchements particuliers sont recouverts d'un isolant protégé mécaniquement d'une façon suffisante, soit par l'armature du câble, soit par des conduites en matière résistante et durable.

La canalisation principale doit être sectionnée en tronçons, et les canalisations privées doivent pouvoir être débranchées pour les vérifications.

En appelant E la tension efficace maximum entre deux conducteurs, exprimée en volts, la résistance absolue d'isolement de chaque tronçon ne doit jamais être inférieure à $5E^2$ ohms.

Digitized by Google

Dans les villes, les câbles sont posés, en général, sous les trottoirs, et à une profondeur minimum de $0^m,60$; dans les traversées de chaussées ils sont au moins à $0^m,80$ de profondeur.

La distance minimum des câbles d'énergie électrique aux canalisations d'eau, de gaz ou d'une autre Compagnie d'électricité, est $0^m,30$.

Dans les avenues complantées d'arbres, les tranchées sont à $1^m,40$ de l'alignement des arbres.

On fait une fouille d'environ $0^m,50$ de largeur, puis on met une couche de sable ou de terre criblée d'au moins $0^m,05$ d'épaisseur. On pose alors les câbles, que l'on recouvre d'au moins $0^m,05$ de sable ou de terre criblée, puis on pilonne pardessus une couche de terre de $0^m,10$ à $0^m,20$ d'épaisseur sur laquelle on place des briques jointives, à plat, ou un tissu de fil de fer galvanisé, à larges mailles, destinés à signaler la présence de la canalisation.

On ménage une distance de $0^m,05$ entre les câbles d'une même Compagnie, pour réduire les chances d'avaries mutuelles.

Digitized by Google

CHAPITRE IV.

TRANSFORMATION DES COURANTS POLYPHASÉS.

Nous étudierons dans ce Chapitre la transformation des courants polyphasés en courants polyphasés de tension quelconque, de même ordre ou d'ordre différent, de même fréquence ou de fréquence différente. Cette transformation peut être obtenue à l'aide de deux sortes d'appareils :

1° Transformateurs immobiles ou *statiques;*

2° Transformateurs rotatifs.

Nous réservons pour le Chapitre suivant l'étude de la transformation des courants polyphasés en courant continu et réciproquement.

§ I. — Transformateurs statiques.

Un courant polyphasé étant constitué par plusieurs courants alternatifs dont les phases diffèrent, sa transformation en un courant polyphasé du même ordre et de tension quelconque peut évidemment être réalisée au moyen de transformateurs à courant alternatif en nombre égal à celui des courants composants.

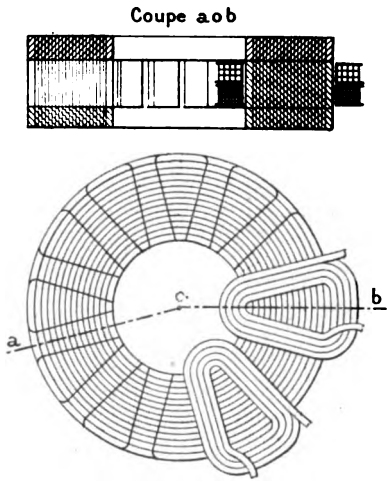
I. — *Transformateurs à courant diphasé.*

Par exemple, la transformation d'un courant diphasé pourra s'obtenir au moyen de deux transformateurs à courant alternatif montés chacun sur l'une des deux sections. C'est du reste la méthode généralement employée dans le cas du courant diphasé.

Digitized by Google

Le transformateur *Schuckert*, à courant diphasé, représente une variante de ce système. Le noyau magnétique de ce transformateur (*fig.* 132) est en deux parties. L'une, formée d'un ruban de tôle mince enroulé en spirale, a la forme d'un anneau plat dans lequel sont pratiquées des rainures radiales, en nombre multiple de quatre, déterminant sur l'une des faces du disque une série de dents parallèles à

Fig. 132.



l'axe. De deux en deux ces dents portent une bobine primaire et une bobine secondaire superposées.

Les bobines primaires situées à gauche du diamètre XX′ (*fig.* 133) sont reliées en série ou en quantité, et constituent l'une des deux sections primaires. Les bobines secondaires correspondantes sont également réunies en série ou en quantité, et forment l'une des deux sections secondaires. Les bobines disposées à droite du diamètre XX′ sont connectées respectivement de la même manière et constituent la seconde section primaire et la seconde section secondaire.

Le noyau est complété par un disque uni, formé également d'un ruban de tôle mince enroulé en spirale, que l'on presse sur les dents du premier au moyen de boulons.

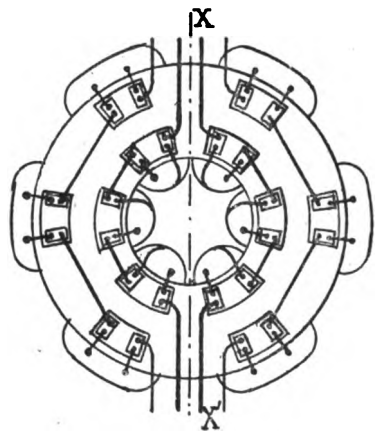
Digitized by Google

Le flux engendré par l'un quelconque des enroulements partiels se ferme par le couvercle et par les deux dents situées de part et d'autre.

Les connexions des deux séries de bobines primaires sont montées sur le bord extérieur du couvercle; celles des bobines secondaires sont fixées sur le bord intérieur de cet anneau.

On reconnaît aisément que, si l'on veut que la densité d'induction magnétique soit la même dans toutes les sections du noyau, les dents doivent toutes avoir la même section et

Fig. 133.



que la section transversale du couvercle ainsi que celle du fer réunissant deux dents doivent être égales chacune à la moitié de la section normale d'une dent.

Ce transformateur se compose, en somme, de deux transformateurs à courant alternatif accolés, à peu près indépendants.

Un transformateur à courant diphasé peut encore être constitué par une carcasse magnétique formée de trois noyaux A, C, B reliés par deux culasses D, E (*fig.* 134), les deux noyaux extrêmes portant chacun les enroulements primaire et secondaire de l'une des deux sections. Le flux de chaque noyau actif se ferme par les culasses et par les deux autres noyaux.

Digitized by Google

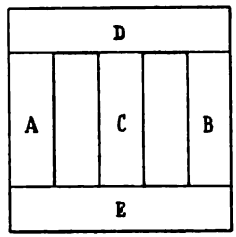
En désignant par $\Phi \sin 2\pi nt$ le flux à l'instant t dans le noyau A, et par $\Phi \sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right) = -\Phi \cos 2\pi nt$ le flux dans le noyau B, le flux dans le noyau C est

$$\Phi\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{4}\right),$$

dont la valeur maximum est $\Phi\sqrt{2}$.

Si donc on voulait que la densité d'induction magnétique

Fig. 134.



fût la même en tous les points de la masse magnétique, on devrait donner aux culasses D et E la même section qu'aux noyaux actifs A et B, et au noyau C la section de l'un des noyaux A ou B multipliée par $\sqrt{2} = 1,41$.

Si, au contraire, on donnait au noyau C la même section qu'aux noyaux A, B, la densité d'induction magnétique dans C serait de 41 pour 100 supérieure à celle des noyaux A, B.

Cette construction donne un appareil assez simple, mais elle présente l'inconvénient d'introduire un noyau C non actif servant uniquement au retour du flux : elle augmente donc le volume du fer, et par suite les pertes par hystérésis et courants de Foucault.

Voici quelques données sur un transformateur à courant diphasé de ce type, étudié par l'auteur :

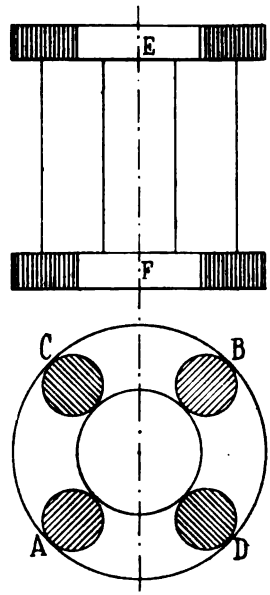
Puissance aux bornes, en kilowatts.....	20
Fréquence, en périodes par seconde.....	50
Tension aux bornes primaires d'une section, en volts.....	3000
Courant à une borne primaire, en ampères ...	3,5

Digitized by Google

Tension aux bornes secondaires d'une section, en volts	115
Courant à une borne secondaire, en ampères	87
Section de chacun des trois noyaux et d'une culasse en millimètres	130 × 130
Longueur d'un noyau entre les culasses, en millimètres	690
Induction dans le fer, en gauss	4000
Nombre de spires primaires d'une section	1950
Diamètre des fils primaires, en millimètres	2,5
Nombre de spires secondaires d'une section	76
Section des conducteurs secondaires, en millimètres carrés	72
Poids du noyau de fer, en kilogrammes	430
Poids du cuivre, en kilogrammes	270

On peut encore former la carcasse magnétique de quatre

Fig. 135.



noyaux A, B, C, D réunis à leurs extrémités par deux culasses E, F (*fig.* 135). Les noyaux A et B portent chacun la moitié de

Digitized by Google

l'enroulement primaire et la moitié de l'enroulement secondaire de l'une des deux sections, les noyaux C et D recevant les enroulements de la seconde section.

En désignant par Φ le flux maximum dans l'un quelconque des noyaux, le flux maximum dans une section des culasses entre deux noyaux est $\Phi \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707\Phi$.

Ce dispositif ne possède aucune supériorité sur le système de deux transformateurs à courant alternatif séparés. En effet, il ne réduit ni le poids de cuivre, ni le poids de fer. Du reste, il ne réalise pas l'*enchaînement* des deux sections.

II. — *Transformateurs à courant triphasé.*

La transformation d'un courant triphasé de tension donnée en un autre courant triphasé de tension quelconque peut évidemment être obtenue au moyen de trois transformateurs à courant alternatif, chacun correspondant à l'une des trois sections. Cette méthode est généralement appliquée en Amérique. Elle ne souffre pas d'objection, au point de vue de la complication, du prix et du rendement, lorsque les unités de transformation sont de grande puissance. C'est le cas qui se présente en particulier pour les transformateurs élévateurs des usines génératrices et pour les transformateurs détendeurs. Par exemple, un groupe de transformateurs élévateurs représentant une puissance totale de 3000 kilowatts peut être constitué par six transformateurs à courant triphasé de 500 kilowatts, ou encore par deux groupes de trois transformateurs à courant alternatif de 500 kilowatts.

Pour les faibles puissances cette méthode serait onéreuse et compliquée, et le rendement se trouverait réduit. Il n'est évidemment pas à recommander de réaliser la transformation d'une puissance de 3 kilowatts, par exemple, au moyen de trois transformateurs à courant alternatif de 1 kilowatt : un transformateur à courant triphasé de 3 kilowatts sera moins cher, moins encombrant, et d'un meilleur rendement.

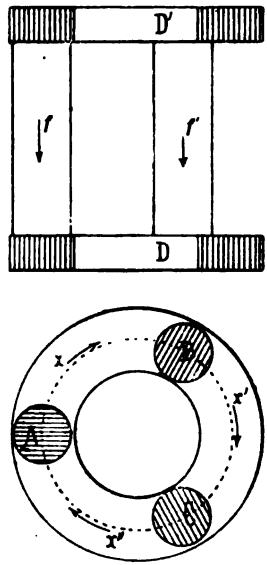
Considérons une carcasse de fer (*fig.* 136) formée de trois noyaux parallèles A, B, C reliés magnétiquement à leurs extré-

Digitized by Google

mités par deux couronnes de fer D, D'. Les colonnes A, B, C sont des faisceaux de fils de fer ou de tôle, et les anneaux D, D' sont formés d'un ruban de tôle enroulé en spirale.

Chacun des noyaux porte une bobine primaire et une bobine secondaire correspondant à une section. Les trois enroule-

Fig. 136.



ments primaires, de même que les trois enroulements secondaires, sont reliés soit en étoile, soit en triangle.

Appelons :

e_1, e'_1, e''_1 les tensions instantanées aux bornes des trois enroulements primaires;

E_1 leur moyenne efficace;

i_1, i'_1, i''_1 les courants primaires instantanés;

I_1 leur moyenne efficace;

n la fréquence;

Digitized by Google

R_1 la résistance d'une bobine primaire;

e_2, e'_2, e''_2 les forces électromotrices secondaires;

E_2 leur moyenne efficace;

i_2, i'_2, i''_2 les courants secondaires;

I_2 leur moyenne efficace;

N_1 le nombre de spires d'une section primaire;

N_2 le nombre de spires d'une section secondaire;

S la section des noyaux A, B, C, en centimètres carrés;

σ la section transversale des couronnes D, D', en centimètres carrés;

f, f', f'' les flux instantanés dans les noyaux A, B, C;

Φ leur maximum;

x, x', x'' les flux dans les tronçons de couronnes situés entre les noyaux A, B, C;

X leur maximum.

On a par hypothèse

$$(1)\qquad \begin{cases} e_1 = E_1\sqrt{2}\sin 2\pi nt, \\ e'_1 = E_1\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right), \\ e''_1 = E_1\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right), \end{cases}$$

d'où

$$(2)\qquad e_1 + e'_1 + e''_1 = 0.$$

Les trois enroulements primaires donnent

$$(3)\qquad \begin{cases} e_1 - R_1 i_1 - N_1 \frac{df}{dt} = 0, \\ e'_1 - R_1 i'_1 - N_1 \frac{df'}{dt} = 0, \\ e''_1 - R_1 i''_1 - N_1 \frac{df''}{dt} = 0. \end{cases}$$

Digitized by Google

En considérant les trois circuits secondaires, on a

$$(4)\qquad \begin{cases} -e_2 - N_2 \dfrac{df}{dt} = 0, \\ -e'_2 - N_2 \dfrac{df'}{dt} = 0, \\ -e''_2 - N_2 \dfrac{df''}{dt} = 0. \end{cases}$$

Si la valeur maximum des pertes de tension $R_1 i_1$, $R_1 i'_1$, $R_1 i''_1$ est très petite par rapport au maximum des tensions e_1, e'_1, e''_1, les fonctions $\frac{df}{dt}$, $\frac{df'}{dt}$, $\frac{df''}{dt}$ sont sensiblement sinusoïdales, quelle que soit la forme des courants primaires i_1, i'_1, i''_1, et l'on a

$$(5)\qquad \frac{df}{dt} + \frac{df'}{dt} + \frac{df''}{dt} = 0$$

et

$$(6)\qquad f + f' + f'' = 0.$$

Le circuit magnétique d'un transformateur à courant triphasé présente une grande analogie avec un circuit à courant triphasé; la relation (6) exprime que le flux magnétique produit par les enroulements d'un noyau trouve son retour dans les deux autres noyaux.

On voit encore [éq. (3) et (4)] que les phases des tensions secondaires sont sensiblement opposées à celles des tensions primaires respectives.

Nous pouvons écrire, en désignant par ψ un angle différant peu de $\frac{\pi}{2}$, et inférieur :

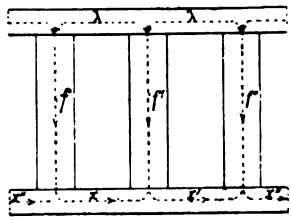
$$(7)\qquad \begin{cases} f = \Phi \sin(2\pi n t - \psi), \\ f' = \Phi \sin\left(2\pi n t - \psi - \dfrac{2\pi}{3}\right), \\ f'' = \Phi \sin\left(2\pi n t - \psi - \dfrac{4\pi}{3}\right). \end{cases}$$

Considérons maintenant les flux x, x', x'' dans chacune des

Digitized by Google

culasses. La figure 137 représente la carcasse magnétique développée suivant le cylindre moyen.

Fig. 137.



On a évidemment

$$(8)\qquad \begin{cases} x - x'' = f, \\ x' - x = f', \\ x'' - x' = f''. \end{cases}$$

$$(9)\qquad \begin{cases} 2\dfrac{\lambda}{\mu\sigma}x = 4\pi N_1(i_1 - i''_1) - \dfrac{1}{\mu S}(f - f'), \\ 2\dfrac{\lambda}{\mu\sigma}x' = 4\pi N_1(i'_1 - i''_1) - \dfrac{1}{\mu S}(f' - f''), \\ 2\dfrac{\lambda}{\mu\sigma}x'' = 4\pi N_1(i''_1 - i_1) - \dfrac{1}{\mu S}(f'' - f). \end{cases}$$

En additionnant ces trois dernières relations membre à membre, il vient

$$(10)\qquad x + x' + x'' = 0.$$

On tire des relations (8) et (10)

$$(11)\qquad x = \frac{1}{3}(f - f')$$

ou

$$x = \frac{\Phi}{3}\left[\sin(2\pi nt - \psi) - \sin\left(2\pi nt - \psi - \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$
$$= \frac{\Phi\sqrt{3}}{3}\sin\left(2\pi nt - \psi + \frac{\pi}{6}\right).$$

Le maximum absolu du flux x est donc

$$X = \frac{\Phi\sqrt{3}}{3} = 0,577\,\Phi.$$

Digitized by Google

Si donc on veut que la densité magnétique maximum soit la même dans les culasses que dans les noyaux portant les enroulements, on prendra

$$\sigma = 0,577\,S.$$

Cela posé, le calcul d'un transformateur à courant triphasé diffère peu de celui de trois transformateurs à courant alternatif ayant chacun une puissance égale au tiers de la puissance du transformateur à courant triphasé.

La figure 136 (p. 264) montre la forme générale de la carcasse magnétique des transformateurs à courant triphasé employés dans le transport d'énergie de Lauffen à Francfort, en 1891. Le transformateur élévateur installé à Lauffen avait une puissance de 200 kilowatts. La tension normale entre les extrémités d'une bobine primaire, c'est-à-dire entre une borne primaire et le centre de l'étoile, était égale à 50 volts. Les enroulements secondaires, à haute tension, étaient également montés en étoile.

Le rapport des nombres de spires primaires et de spires secondaires étant 1 : 160, la tension entre une borne secondaire et le centre de l'étoile était d'environ 8000 volts, et la tension aux bornes de 13856 volts. La tension dans chaque section primaire pouvait être portée à 55 volts. La fréquence était 40 périodes par seconde.

Les deux enroulements primaire et secondaire sont concentriques, la bobine primaire, en gros fil, étant enroulée près du noyau, et la bobine secondaire, en fil fin, étant superposée à la première. Les deux enroulements sont isolés l'un de l'autre au moyen d'un manchon de porcelaine. En outre, l'enroulement secondaire est subdivisé en un grand nombre de bobines élémentaires à l'aide de cloisons isolantes perpendiculaires à l'axe, formant ainsi une bobine sectionnée.

Le transformateur, après avoir été soigneusement séché, à été introduit dans une enveloppe de tôle que l'on a remplie d'huile.

Les noyaux sont généralement formés de tôle mince. Les culasses, au lieu d'être composées d'un ruban de tôle enroulé en spirale, peuvent être constituées par des disques de tôle

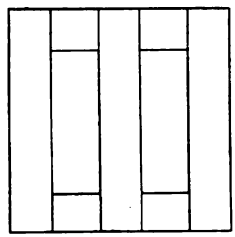
Digitized by Google

portant à la périphérie trois pans distants de 120°, et sur lesquels viennent se serrer les trois noyaux. Les axes de ceux-ci sont ainsi disposés suivant les arêtes d'un prisme équiangle.

Un mode de construction simple consiste à placer les trois noyaux dans un même plan en les réunissant par des culasses formées de paquets de tôles droites. La forme de la carcasse magnétique ainsi constituée est alors la même que dans le cas d'un transformateur à courant diphasé à trois noyaux, sauf que dans le transformateur à courant triphasé les trois noyaux sont évidemment égaux. Ce dispositif est employé principalement pour les petits transformateurs.

Quelques constructeurs donnent aux noyaux la longueur totale de la carcasse magnétique, et les réunissent à leurs extrémités au moyen de quatre paquets de tôles (*fig.* 138).

Fig. 138.



Des boulons transversaux serrent ces diverses pièces ensemble. Les noyaux sont disposés soit verticalement, soit horizontalement.

Voici quelques données sur un transformateur de ce type, à noyaux verticaux, construit par la Compagnie de Fives-Lille [1] :

Puissance aux bornes, en kilowatts.....	160
Tension aux bornes primaires, en volts....	72
Tension aux bornes secondaires, en volts...	7200
Rapport de transformation.....	1 : 100

[1] D. Korda, *Elektrotechnische Zeitschrift* du 25 juin 1897, p. 390.

Digitized by Google

Fréquence, en périodes par seconde.....	50
Longueur d'un noyau entre les culasses, en millimètres.....	1840
Section d'un noyau, en centimètres carrés.	332
Induction maximum dans le fer, en gauss..	4700
Nombre de bobines par section primaire...	66
Nombre de spires par bobine primaire.....	12
Section du fil primaire, en millimètres carrés.....	30
Montage des 66 bobines d'une section primaire.....	en quantité
Montage des trois sections primaires.....	en étoile
Résistance d'une section primaire, en ohms.	0,000143
Nombre de bobines par section secondaire.	6
Nombre de spires par bobine secondaire...	210
Section des fils secondaires, en millimètres carrés.....	20
Montage des six bobines secondaires d'une section.....	en série
Montage des trois sections secondaires.....	en étoile
Résistance d'une section secondaire, en ohms.	1,5
Perte de puissance dans le cuivre, en kilowatts.....	1,50
Perte de puissance dans le fer, en kilowatts.	3,68
Rendement, pour 100.....	97
Surface refroidissante par watt dépensé (cuivre et fer), en centimètres carrés....	17

Les carcasses de carton des bobines sont rondes. Les noyaux magnétiques sont formés de tôles de trois largeurs différentes, de façon à réduire le diamètre des bobines.

Les deux enroulements sont concentriques, l'enroulement à haute tension étant intérieur, et celui à basse tension, extérieur. Ils sont séparés par un intervalle d'air de 10^{mm} d'épaisseur ayant pour but de ventiler les bobines.

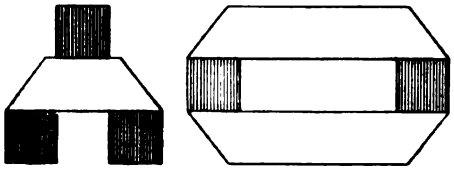
La surface refroidissante totale est 85000^{cm^2}, sans compter l'espace annulaire entre les deux enroulements.

Le mode de construction d'Alioth est très simple. Les trois noyaux ont la forme de trapèze et sont reliés par des culasses de même forme (*fig.* 139). L'un des noyaux s'appuie sur la

Digitized by Google

petite base du trapèze, tandis que les deux autres noyaux viennent s'appliquer sur la grande base.

Fig. 139.



La Société Alioth emploie aussi la disposition des trois noyaux dans un même plan.

Voici encore quelques données sur deux transformateurs à courant triphasé de 30 kilowatts et de 200 kilowatts.

La carcasse magnétique est formée de trois noyaux de tôle verticaux, à section carrée, reliés latéralement, à leurs extrémités, par des anneaux de tôle portant sur leur périphérie trois pans distants de 120°. Les bobines primaires et secondaires sont concentriques et enroulées sur des carcasses cylindriques en matière isolante. Les bobines à haute tension sont extérieures.

Transformateur à courant triphasé de 30 *kilowatts.*

Puissance, en kilowatts.....	30
Tension aux bornes primaires, en volts....	2000
Courant à une borne primaire, en ampères.	9
Tension aux bornes secondaires, en volts..	110
Courant à une borne secondaire, en ampères.	157
Fréquence, en périodes par seconde.....	50

Carcasse magnétique.

Section d'un noyau, en centimètres carrés.	169
Longueur d'un noyau, en millimètres.....	950
Épaisseur des tôles, en millimètres.....	0,5
Poids total de la tôle, en kilogrammes.....	540
Induction maximum dans le fer, en kilogauss.	3,38

Digitized by Google

Enroulement primaire.

Nombre de bobines par noyau	2
Nombre de spires par bobine	446
Diamètre des fils, en millimètres	3,5
Montage des deux bobines	en série
Montage des trois sections	en étoile
Poids du cuivre, en kilogrammes	225

Enroulement secondaire.

Nombre de bobines par noyau	2
Nombre de spires par bobine	50
Section des conducteurs, en mm²	66
Montage des deux bobines	en quantité
Montage des trois sections	en étoile
Poids du cuivre, en kilogrammes	153

Pertes et rendement.

Perte dans le fer, en kilowatts	0,665
Perte dans l'enroulement primaire, en kilowatts	0,374
Perte dans l'enroulement secondaire, en kilowatts	0,388
Perte totale, en kilowatts	1,427
Rendement, pour 100	95,5
Perte de tension dans l'enroulement primaire, pour 100	1,25
Perte de tension dans l'enroulement secondaire, pour 100	1,29

Surfaces refroidissantes.

Bobines extérieures, en cm² par watt perdu.	55
Bobines intérieures, en cm² par watt perdu.	36
Noyau, en cm² par watt perdu	30

Transformateur à courant triphasé de 200 kilowatts.

Puissance, en kilowatts	200
Tension aux bornes primaires, en volts	5000
Courant à une borne primaire, en ampères.	24
Tension aux bornes secondaires, en volts	125
Courant à une borne secondaire, en ampères.	925
Fréquence, en périodes par seconde	50

Digitized by Google

Carcasse magnétique.

Section d'un noyau, en centimètres carrés..	480
Longueur d'un noyau, en millimètres.....	1800
Épaisseur des tôles, en millimètres.....	0,5
Poids total de la tôle, en kilogrammes.....	2500
Induction maximum dans le fer, en kilogauss.	3,35

Enroulement primaire.

Nombre de bobines par noyau.....	24
Nombre de spires par bobine.....	33
Diamètre des fils, en millimètres.....	5,4
Montage des 24 bobines.....	en série
Montage des trois sections.....	en étoile
Poids du cuivre, en kilogrammes.....	700

Enroulement secondaire.

Nombre de bobines par noyau.....	6
Nombre de spires par bobine.....	20
Section des conducteurs, en millimètres carrés.....	154
Montage des 6 bobines.....	en quantité
Montage des trois sections.....	en étoile
Poids du cuivre, en kilogrammes.....	700

Pertes et rendement.

Perte dans le fer, en kilowatts.....	3,00
Perte dans l'enroulement primaire, en kilowatts.....	1,58
Perte dans l'enroulement secondaire, en kilowatts.....	1,10
Perte totale, en kilowatts.....	5,68
Rendement, pour 100.....	97
Perte de tension dans l'enroulement primaire, pour 100.....	0,79
Perte de tension dans l'enroulement secondaire, pour 100.....	0,56

Surfaces refroidissantes.

Bobines extérieures, en cm² par watt perdu.	33
Bobines intérieures, en cm² par watt perdu.	40
Noyau, en cm² par watt perdu.....	20

Digitized by Google

III. — *Calcul des transformateurs.*

Le transformateur moderne dérive de l'appareil d'induction employé par Faraday en 1835. Il se composait d'un anneau de fer portant sur chaque demi-circonférence une bobine dont l'une recevait un courant à interruptions rapides, et dont l'autre fournissait un courant d'induction.

Le transformateur est la base, la raison d'être des grandes distributions d'énergie par courant alternatif ou polyphasé. Sa première application industrielle est due à Gaulard et a été faite à l'Exposition d'Électricité installée dans l'Aquarium, à Londres, en 1883. Gaulard fit, la même année, une seconde application de son système pour l'éclairage de quelques stations du *Metropolitan Railway*.

L'introduction du transformateur dans l'industrie électrique a imprimé un grand essor aux distributions d'énergie électrique, dont elle a rendu un certain nombre possibles, en permettant l'emploi de tensions élevées réduites aux points d'utilisation à la tension désirée, au moyen d'un appareil très simple, immobile, d'un rendement très élevé, et n'exigeant à peu près aucune surveillance.

L'étude d'un transformateur à courant polyphasé est très analogue à celle d'un transformateur à courant alternatif. Nous avons indiqué plus haut les particularités relatives au premier.

Soient :

S la section du noyau de fer, en centimètres carrés;

$\mathfrak{B}$ la densité d'induction maximum;

N le nombre de spires d'une bobine;

n la fréquence.

La force électromotrice instantanée dans la bobine est

$$e = -2\pi n \mathrm{N} \mathrm{S} \mathfrak{B} \cos 2\pi n t \, 10^{-8} \text{ volts},$$

dont la valeur efficace est

$$\mathrm{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi n \mathrm{N} \mathrm{S} \mathfrak{B} \, 10^{-8} = 4{,}44 \, n \mathrm{N} \mathrm{S} \mathfrak{B} \, 10^{-8} \text{ volts}.$$

Digitized by Google

La puissance de la bobine considérée est donc proportionnelle à n et à $\mathfrak{B}$.

Si l'on considère des transformateurs à courant triphasé de différentes puissances, travaillant sur des circuits ne décalant pas le courant, on peut admettre, à titre d'indication, pour des fréquences de 40 à 60 périodes par seconde, les nombres suivants :

PUISSANCE du transformateur.	PERTE dans le cuivre.	PERTE dans le fer.	RENDEMENT.
1 kilowatt.....	3 pour 100	6 à 7 pour 100	90 à 91 pour 100
20 kilowatts.....	2 pour 100	2,5 pour 100	95,5 pour 100
150 kilowatts....	1,5 pour 100	1,5 pour 100	97 pour 100
1000 kilowatts...	1 pour 100	1 pour 100	98 pour 100

Les pertes dans le fer sont de deux sortes :

1° Perte par hystérésis. Elle se calcule au moyen de la formule de Steinmetz :

$$W_h = \eta n \mathfrak{B}^{1,6} 10^{-4}.$$

Dans cette formule W_h est la perte en watts par décimètre cube de fer soumis à l'induction maximum $\mathfrak{B}$; η est un coefficient qui dépend de la qualité du fer. Pour les tôles de transformateurs, η varie ordinairement entre 0,002 et 0,004.

Si l'on passe d'une induction $\mathfrak{B}$ à une induction $\mathfrak{B}'$, on a

$$\frac{W'_h}{W_h} = \frac{\eta n \mathfrak{B}'^{1,6}}{\eta n \mathfrak{B}^{1,6}} = \left(\frac{\mathfrak{B}'}{\mathfrak{B}}\right)^{1,6} = K^{1,6},$$

d'où

$$W'_h = W_h K^{1,6}.$$

Pour faciliter les calculs, nous avons dressé le Tableau suivant, qui permet de trouver aisément la perte par hystérésis

Digitized by Google

pour une induction $K\mathfrak{B}$, lorsque la perte pour l'induction $\mathfrak{B}$ est connue.

K.	$K^{1,6}$.	K.	$K^{1,6}$.	K.	$K^{1,6}$.	K.	$K^{1,6}$.
1	1	1,5	1,91	2	3,03	3	5,80
1,1	1,165	1,6	2,12	2,2	3,53	3,3	6,75
1,2	1,34	1,7	2,33	2,4	4,11	3,5	7,42
1,3	1,52	1,8	2,57	2,5	4,43	4	9,19
1,4	1,71	1,9	2,80	2,7	4,90		

2° Perte par courants de Foucault. Cette perte, en watts par décimètre cube, pour des tôles d'épaisseur δ millimètres, est donnée par la formule [1]

$$W_F = 0,016\,\delta^2 n^2 \mathfrak{B}^2 10^{-8},$$

Pour une épaisseur de tôle de $0^{mm},5$, cette formule devient

$$W_F = 0,004\,n^2 \mathfrak{B}^2 10^{-8}.$$

Nous reproduisons ci-dessous (*fig.* 140) deux courbes données par M. Kapp. La courbe B a trait à un transformateur enfermé dans une enveloppe métallique fermée; la courbe A se rapporte à un transformateur enfermé dans une caisse pleine d'huile, mais sans circulation artificielle, ou dans une enveloppe perforée, avec bonne circulation d'air. Ces courbes montrent que, pour une même surface refroidissante par watt perdu dans le transformateur, l'élévation de température au-dessus de la température de l'air ambiant est d'environ 35 pour 100 supérieure pour le transformateur non ventilé.

D'après M. Kapp, on peut admettre une élévation de température de 54° au-dessus de celle de l'air ambiant.

Pour l'établissement du prix de revient des transfor-

(1) Cette formule est déduite de celles contenues dans l'Ouvrage de M. Fleming : *The alternate current transformer*, t. II, 1892, p. 489 et suiv.

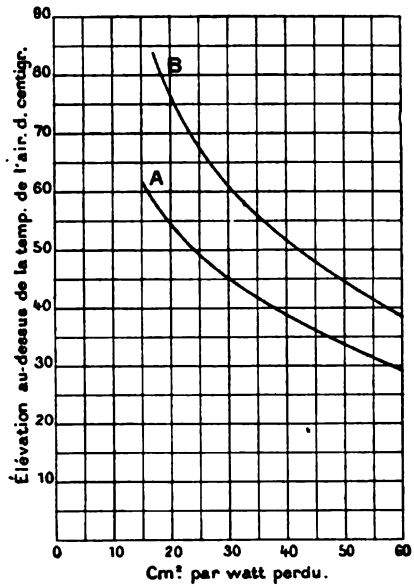
Digitized by Google

mateurs, M. Kapp indique que l'on peut compter sur les prix approximatifs suivants :

Par kilogramme de tôle réelle	$0^{fr},95$
Par kilogramme de cuivre.....	$2^{fr},20$

Le prix de revient du transformateur s'obtient en multi-

Fig. 140.



pliant par 2,5 ou par 3 la somme des prix de la tôle et du cuivre.

Disons enfin, à titre d'indication, que, d'après les transformateurs que nous avons construits, on peut compter, pour des fréquences de 40 à 60 périodes par seconde, environ 15^{kg} de tôle réelle et 10^{kg} de cuivre par kilowatt pour un transformateur à courant triphasé de 20 kilowatts. Ces poids varient entre 30^{kg} de tôle et 16^{kg} de cuivre pour un transformateur de 2,5 kilowatts, et 10^{kg} de tôle et 6^{kg} de cuivre pour un transformateur de 200 kilowatts.

Digitized by Google

Courant à vide. — En désignant par i_μ le courant efficace d'aimantation, en ampères, et par i_h le courant efficace correspondant à la puissance absorbée par l'hystérésis et les courants de Foucault, le courant à vide i_0 a pour expression

$$(1) \qquad i_0 = \sqrt{i_\mu^2 + i_h^2} \text{ ampères.}$$

En appelant $\mathfrak{B}$ l'induction maximum, l la longueur du circuit magnétique en centimètres, et N_1 le nombre de spires primaires, on a

$$(2) \qquad \mathfrak{B} = \frac{0,4\pi N_1 i_\mu \sqrt{2}\mu}{l} = \mu \frac{1,78 N_1 i_\mu}{l},$$

d'où

$$(3) \qquad i_\mu = \frac{\mathfrak{B}}{1,78\mu N_1} \text{ ampères.}$$

M. Fleming indique que, d'après les recherches qu'il a effectuées sur une série de transformateurs, on peut adopter pour les valeurs moyennes de la perméabilité du bon fer doux les valeurs du Tableau suivant, diminuées de 200 unités :

INDUCTION MAXIMUM $\mathfrak{B}$ en kilogauss.	PERMÉABILITÉ μ.
1	560
2	880
3	1,160
4	1,400
5	1,600
6	1,800
7	1,960
8	2,120
9	2,280
10	2,350

Si le noyau magnétique comporte des joints, il faut évidemment en tenir compte. On peut admettre pour leur longueur $0^{mm},5$.

Digitized by Google

IV. — *Montage en quantité des transformateurs à courant triphasé.*

Lorsque des transformateurs à courant triphasé sont destinés à alimenter un même réseau secondaire, ils ont à satisfaire aux conditions suivantes :

1° Ils doivent tous donner la même tension à vide, et la même chute de tension à pleine charge, dans les conditions de fonctionnement auxquelles ils seront soumis;

2° Les phases des tensions des sections secondaires correspondantes doivent coïncider. Par exemple, on ne pourrait pas accoupler en quantité le secondaire d'un transformateur dont le primaire et le secondaire sont montés en étoile avec le secondaire d'un transformateur dont le primaire serait monté en étoile et le secondaire en triangle, car dans ce cas les phases des tensions secondaires différeraient deux à deux de 30 degrés.

Du reste, le constructeur doit indiquer les bornes des transformateurs, tant primaires que secondaires, qui doivent être connectées ensemble.

Si cette indication faisait défaut, et si l'examen des enroulements ne pouvait y suppléer, on reconnaîtrait aisément les bornes secondaires correspondantes de la façon simple suivante : Soient A, B, C, A′, B′, C′ les bornes secondaires de deux transformateurs. Si le secondaire est à 110 volts, par exemple, on montera une lampe à incandescence de 110 volts en tension entre A et A′, et de même entre B et B′, et on lancera le courant primaire. Si les bornes A et A′, B et B′, C et C′ se correspondent, les lampes ne s'allumeront pas.

Lorsque plusieurs transformateurs alimentent en quantité un même réseau secondaire, il est évidemment nécessaire, avant de toucher au primaire de l'un d'eux, d'isoler non seulement ce primaire de la canalisation à haute tension, mais encore le secondaire du réseau à basse tension; sans cette précaution la haute tension existerait aux bornes primaires grâce à l'induction produite par le secondaire.

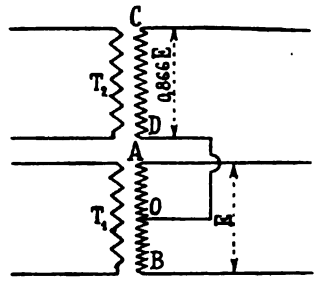
Digitized by Google

V. — *Transformation d'un courant diphasé en courant triphasé, et réciproquement.* (Système *C.-F. Scott.*)

Parmi les systèmes proposés pour transformer un courant diphasé en courant triphasé, et réciproquement, *au moyen d'appareils fixes,* nous décrirons seulement le procédé remarquable, vraiment pratique, imaginé par l'ingénieur C.-F. Scott, et qui a reçu plusieurs applications en Amérique.

Considérons [1] deux transformateurs à courant alternatif T_1 et T_2, dont les enroulements primaires sont soumis respec-

Fig. 141.



tivement à deux tensions alternatives de même fréquence et différant en phases d'un quart de période.

Admettons que les flux maxima dans les noyaux des deux transformateurs sont égaux, et que les nombres de spires de leurs enroulements secondaires sont dans le rapport

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{1} = 0,866,$$

de telle sorte que la tension aux bornes secondaires de T_1 étant E, la tension aux bornes secondaires de T_2 est

$$E\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866\ E.$$

---

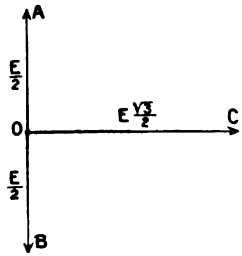
[1] Rodet, *Sur le système de transformation de M. C.-F. Scott* (*L'Industrie électrique*, n° 130, 25 mai 1897, p. 203 et suiv.).

Digitized by Google

En pratique les tensions primaires des deux transformateurs ont même moyenne efficace.

Relions l'une des bornes secondaires de T_2 au milieu O de l'enroulement secondaire de T_1 (*fig.* 141). Le diagramme de la figure 142 représente les trois tensions efficaces ou, à un

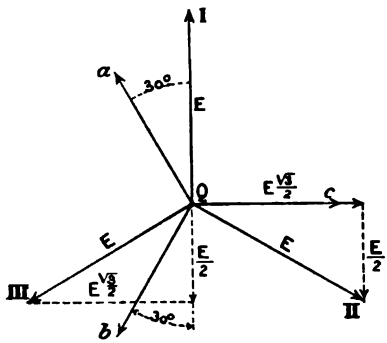
Fig. 142.



facteur près, les trois tensions maxima entre le point O d'une part et les bornes secondaires A, B, C d'autre part.

Ces trois tensions, composées suivant le diagramme de la figure 143, donnent les trois tensions entre les bornes A, B, C.

Fig. 143.



Ces tensions QI, QII, QIII sont toutes les trois égales à E, et leurs phases diffèrent d'un tiers de période. L'appareil constitue donc un transformateur de courant diphasé en courant triphasé.

Digitized by Google

Relions les bornes A, B, C à une ligne formée de trois conducteurs égaux, et montons à l'extrémité de cette ligne des récepteurs sans inductance ni capacité, chargeant également les trois sections.

Les trois fils de ligne seront parcourus par des courants de même moyenne efficace égale à I, dont les phases sont respectivement en avance de 30° sur les trois tensions aux bornes. Ces courants sont donc suivant Qa, Qc, Qb.

La puissance *apparente* aux bornes secondaires du transformateur T_1 est $P_1 = EI$; la puissance réelle est $EI\frac{\sqrt{3}}{2}$.

La puissance aux bornes secondaires du système des deux transformateurs est donc

$$P = \frac{E}{2} I \cos\frac{\pi}{6} + \frac{E}{2} I \cos\frac{\pi}{6} + E\frac{\sqrt{3}}{2} I = EI\sqrt{3}.$$

Si l'on adoptait deux transformateurs à courant alternatif de puissance

$$\frac{P}{2} = EI\frac{\sqrt{3}}{2},$$

l'enroulement composant les deux sections (OA) *et* (OB), c'est-à-dire l'enroulement secondaire du transformateur T_1 dans le cas actuel, engendrerait une puissance *apparente*

$$P_1 = \frac{EI\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = EI = 1,154\left(EI\frac{\sqrt{3}}{2}\right),$$

supérieure de 15 à 16 pour 100 à la puissance normale de *cet enroulement.*

Le rapport de la perte de puissance dans ce cas à la perte à charge normale dans l'enroulement secondaire du transformateur T_1 est

$$\frac{1}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = \frac{4}{3} = 1,33,$$

Digitized by Google

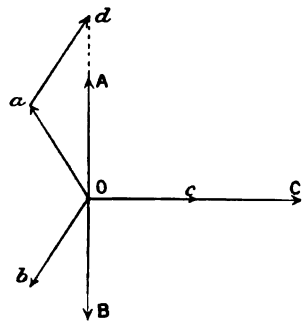
c'est-à-dire que la perte de puissance dans l'enroulement secondaire de T_1 serait de 33 pour 100 supérieure à celle en charge normale.

Si les pertes normales dans les enroulements primaire et secondaire étaient égales, la perte de puissance dans les enroulements du transformateur T_1 serait donc augmentée d'environ 17 pour 100.

La somme des ampères-tours secondaires, à chaque instant, sur le transformateur T_1, est égale au produit de la moitié du nombre de spires secondaires par la somme des projections des courants maxima aux bornes A et B sur un axe perpendiculaire à celui passant par l'origine des temps.

O*a* et O*b* (*fig.* 144) représentant les courants maxima dans

Fig. 144.



les deux sections de l'enroulement secondaire de T_1, la somme des ampères-tours maxima est le produit de la résultante *ad* de O*a* et de — O*b* par la moitié du nombre de spires secondaires. Les ampères-tours secondaires du transformateur T_1 ont donc même phase que la tension secondaire entre les bornes A et B.

Les courants secondaires de T_1 se comportent donc, au point de vue du noyau de fer, comme si l'enroulement secondaire était parcouru par un courant de moyenne efficace $I\frac{\sqrt{3}}{2}$, et dont la phase coïnciderait avec celle de la tension aux bornes secondaires.

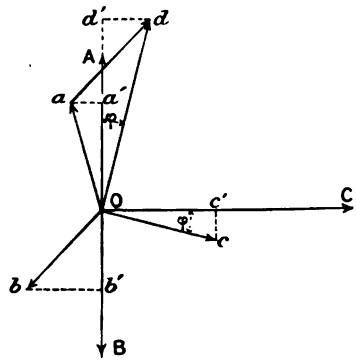
Digitized by Google

De ce qui précède on tire les conclusions suivantes :

1° Le montage Scott n'a pas comme effet de décaler le courant dans les enroulements des deux transformateurs correspondant au courant *diphasé,* par rapport à la tension aux bornes correspondantes. La moyenne efficace des deux courants *constituant le courant diphasé* est la même, pour une puissance donnée, que si les deux transformateurs fonctionnaient comme transformateurs à courant alternatif.

La génératrice de courant diphasé travaille donc dans les mêmes conditions que si elle alimentait une ligne à courant

Fig. 145.



diphasé dont les deux sections seraient chargées identiquement.

2° Les deux courants qui circulent dans l'enroulement secondaire de T_1 *correspondant au courant triphasé, rapportés au sens* BA, présentent sur la tension aux bornes A, B, le premier une avance de phase de 30°, le second un retard de phase de 30°. Les phases de ces deux courants diffèrent par suite entre elles de 60°.

Si donc on veut éviter une grande dispersion magnétique dans le transformateur T_1, on devra disposer ses deux sections secondaires concentriquement, ou bien les enchevêtrer.

3° La perte de puissance *dans l'enroulement de* T_1 *correspondant au courant triphasé* est supérieure de 33 pour 100 à la perte qui se produirait dans cet enroulement si le trans-

Digitized by Google

formateur développait la même puissance en fonctionnant comme transformateur à courant alternatif.

Supposons maintenant que les récepteurs chargent encore également les trois sections, mais que la phase des courants est retardée d'un angle φ par rapport à la tension correspondante aux bornes secondaires.

Faisons tourner les trois vecteurs Oa, Oc, Ob des courants de la figure 144 d'un angle φ autour du point O (*fig.* 145).

Les vecteurs de la figure 145 représentant les valeurs maxima des forces électromotrices et des courants, les puissances engendrées par les trois sections génératrices secondaires ont pour expression

$$\frac{1}{2}(OA \times Oa)\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) = \frac{1}{2}(OA \times Oa'),$$

$$\frac{1}{2}(OB \times Ob)\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right) = \frac{1}{2}(OB \times Ob'),$$

$$\frac{1}{2}(OC \times Oc)\cos\varphi \qquad = \frac{1}{2}(OC \times Oc').$$

En portant ad égal et parallèle à Ob, et en sens contraire, on voit que la somme des puissances aux bornes des sections (OA) et (OB) est

$$\frac{E}{2}\,\frac{Oa' + Ob'}{\sqrt{2}} = \frac{E}{2}\,I\sqrt{3}\cos\varphi.$$

La puissance engendrée dans la section secondaire (OC) est

$$\frac{OC \times Oc'}{2} = E\,\frac{\sqrt{3}}{2}\,I\cos\varphi.$$

La puissance aux bornes du système des deux sections secondaires est donc bien

$$P' = EI\sqrt{3}\cos\varphi.$$

Remarque. — Pour $\varphi = \frac{\pi}{3} = 60°$, la puissance moyenne engendrée dans la section (OB) est nulle.

Digitized by Google

La *Westinghouse Electric and Manufacturing Company* a fait plusieurs applications du système Scott :

Transport d'énergie des chutes du Niagara à Buffalo. — Le courant diphasé à 2300 volts des génératrices de 5000 chevaux est transformé en courant triphasé de 22000 volts, et transmis à Buffalo, à une distance de 43^{km}. Là, il est retransformé en courant diphasé et utilisé en partie dans des transformateurs rotatifs.

Transport d'énergie dans la ville de Hartford. — Le courant diphasé à 500 volts de deux génératrices de 600 kilowatts est transformé en courant triphasé de 10000 volts qui est transmis à Hartford, à une distance d'environ 17^{km}. Là, il est de nouveau transformé en courant diphasé de 2400 volts, et utilisé partiellement comme courant alternatif pour l'éclairage, et partiellement pour charger une batterie d'accumulateurs au moyen d'un convertisseur.

Le système Scott peut évidemment être appliqué aux génératrices elles-mêmes. La maison Ganz a construit des machines à inducteur unipolaire du type Stanley, à enroulements induit et inducteur fixes. Les deux induits engendrent des forces électromotrices dont les phases diffèrent d'un quart de période, et dont les moyennes efficaces sont dans le rapport 1 : 0,866. Les deux enroulements étant accouplés suivant le système Scott produisent un courant triphasé. Ce que nous avons dit au sujet des enroulements secondaires des deux transformateurs montés d'après le système Scott s'applique également aux enroulements d'une telle génératrice.

VI. — *Transformation à l'usine génératrice.*

MM. Marcel Deprez et Jules Carpentier firent breveter en 1881 (1) l'emploi simultané de deux bobines d'induction, l'une pour élever la tension d'un courant, de manière à per-

(1) Fleming, *The alternate current transformer*, t. II, 1892, p. 71.

Digitized by Google

mettre son transport économique à grande distance, la seconde pour abaisser la tension de la ligne, au point d'utilisation. Ces électriciens spécifient que, grâce à ce procédé, il leur a été possible de porter au rouge un fil de platine situé à une distance de plusieurs kilomètres, au moyen de deux éléments Bunsen.

A notre connaissance, la première application industrielle de la transformation à l'usine génératrice a été faite par M. Ferranti, à l'usine de Deptford. Cette station comprend des génératrices de courant alternatif de 1000 kilowatts débitant 100 ampères sous 10000 volts. En outre, deux anciennes machines débitant chacune 200 ampères sous 2400 volts assurent le service pendant les heures de faible débit. A cet effet, des batteries de transformateurs de 112 kilowatts élèvent la tension de ces machines à 10000 volts. A Londres, une série de sous-stations équipées avec ces mêmes transformateurs réduisent la tension à 2400 volts. Le courant est distribué à cette tension, au moyen de câbles concentriques, à des transformateurs placés chez les abonnés et donnant environ 100 volts aux bornes secondaires.

L'usine génératrice de Lauffen, qui desservait l'Exposition d'Électricité de Francfort en 1891, comprenait une machine à courant triphasé donnant une tension d'environ 87 volts aux bornes, et dont le courant traversait le primaire d'un transformateur de 200 kilowatts, immergé dans l'huile, dont le rapport de transformation était 1 : 160; la tension aux bornes secondaires était donc 13900 volts environ.

L'emploi de transformateurs élévateurs de tension permet de simplifier la construction des génératrices. L'enroulement de celles-ci peut être constitué par des barres de cuivre occupant chacune une cannelure du noyau induit et reliées à leurs extrémités par des connexions de cuivre nu. La tension des machines étant en général peu élevée, l'isolation est peu coûteuse, et le fonctionnement des génératrices présente une grande sécurité.

Les transformateurs élévateurs peuvent être placés dans un local fermé. Les manœuvres les plus fréquentes s'effectuant sur les génératrices offrent le minimum de danger pour le personnel de l'usine.

Digitized by Google

L'adjonction de transformateurs élévateurs accroît le prix de premier établissement [1], réduit quelque peu le rendement, et augmente les difficultés du réglage; il est donc recommandable de n'employer autant que possible les transformateurs élévateurs que pour des tensions élevées.

Dans les débuts de l'application des courants polyphasés, les isolants dont on disposait ne possédaient qu'une résistance médiocre à la haute tension. Pour une tension très élevée, ils auraient dû avoir, par suite, une épaisseur telle qu'une faible fraction seulement du volume des cannelures eût été disponible pour loger l'enroulement induit, ce qui aurait réduit considérablement la puissance de la machine. On était amené de la sorte, dans la plupart des cas, à ne pas produire directement plus de 4000 ou 5000 volts. Les tensions plus élevées étaient obtenues à l'aide de transformateurs.

Aujourd'hui l'emploi d'isolants supérieurs permet de construire couramment des génératrices à 10000 volts. Pour les machines puissantes, à grande vitesse tangentielle, on va même jusqu'à 15000 et 20000 volts.

Actuellement la transformation à l'usine génératrice n'est employée, en général, que pour produire des tensions de 10000 à 60000 volts.

Lorsque la tension de la ligne n'est pas très supérieure à celle de la génératrice, et dans le cas où l'isolation de celle-ci est suffisante, on peut employer des transformateurs survolteurs à un ou deux enroulements.

Lorsque la tension de la ligne est très élevée, on fait aboutir en général la ligne à une sous-station de transformation. Celle-ci, qui peut être située aux abords de la ville, renferme une batterie de gros transformateurs qui abaissent la tension à une valeur moyenne, 3000 volts par exemple. Sous cette tension le courant peut être aisément distribué au moyen d'une canalisation souterraine sur laquelle on branche les transformateurs donnant la tension d'utilisation.

---

[1] Les transformateurs à courant triphasé de 100 à 200 kilowatts, pour une fréquence de 40 à 60 périodes par seconde, coûtent environ 60fr le kilowatt; ceux de 1000 kilowatts environ 45fr le kilowatt.

Digitized by Google

VII. — *Isolation et refroidissement des transformateurs.*

On emploie en général, pour la confection des carcasses de bobines de transformateurs, le carton, le carton avec mica, la toile imprégnée de vernis et la micanite.

Les matières fibreuses, telles que le coton, la toile, le papier, bien sèches, sont de très bons isolants. Pour les empêcher d'absorber l'humidité, on les imprègne de gomme-laque dissoute dans l'alcool ou l'essence de térébenthine, de bitume de Judée dissous dans l'essence de térébenthine, ou d'huile de lin. Ces vernis sont susceptibles de s'altérer sous l'action de la chaleur et de l'air.

L'air sec est lui-même un excellent isolant, mais il perd cette qualité quand il devient humide.

Les transformateurs étant en général destinés à rester constamment en circuit, il est très important d'assurer leur refroidissement. Pour ceux dont le fonctionnement est intermittent, on obtient une réduction de poids par un refroidissement énergique.

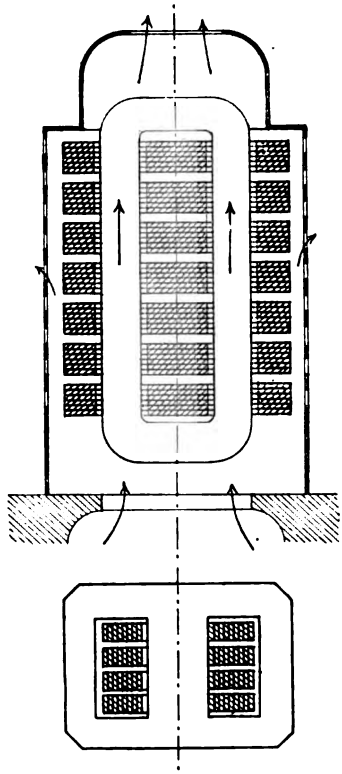
Pour les transformateurs à courant triphasé jusqu'à 200 kilowatts environ, et quand la tension le permet, on se contente en général du refroidissement par ventilation naturelle. On donne aux trois noyaux une section carrée, et on les dispose verticalement, à 120° l'un de l'autre ou dans un même plan, les culasses qui les réunissent étant horizontales. Les enroulements sont portés par des carcasses cylindriques, l'air pouvant ainsi circuler tant entre les bobines et le fer que sur la surface des enroulements. Les bobines primaires et secondaires sont soit alternées, soit concentriques. Dans ce dernier dispositif, on ménage quelquefois une gaine d'air de 10^{mm} à 15^{mm} d'épaisseur entre les deux séries de bobines, afin d'augmenter la ventilation. Le transformateur est enfermé dans une enveloppe dont la paroi verticale est en tôle ondulée; l'air frais pénètre par la base du transformateur et s'échappe par des ouvertures ménagées dans le couvercle. Si le transformateur est installé dans un local à l'abri de l'humidité, la paroi verticale de tôle peut être perforée.

En Amérique on emploie d'une façon générale des trans-

Digitized by Google

formateurs à courant alternatif simple. Pour les unités supérieures à 100 kilowatts on adopte des dispositifs assurant un refroidissement énergique, afin de réduire le prix de ces appareils. Il ne suffit pas de bien refroidir les parties externes des enroulements. En effet, ces parties étant à une tempéra-

Fig. 146.



ture peu élevée, la température moyenne des enroulements, mesurée par l'accroissement de résistance, pourrait être modérée, alors que les parties internes se trouveraient à une température dangereuse.

La figure 146 représente un transformateur refroidi par insufflation d'air. La carcasse magnétique est formée de

Digitized by Google

paquets de tôle séparés les uns des autres par des cales ménageant de nombreux canaux de ventilation. Les bobines plates, verticales, entourent le noyau central. Elles sont formées d'un ruban de cuivre dont les spires sont collées ensemble à l'aide d'un vernis isolant, de façon à constituer une galette rigide que l'on garnit d'une forte enveloppe isolante. Ces bobines sont espacées de façon à permettre la circulation de l'air; les bobines primaires sont alternées avec les bobines secondaires, afin de réduire la dispersion magnétique à une faible valeur. Les deux enroulements sont séparés par de forts diaphragmes isolants. A leurs extrémités supérieure et inférieure les galettes sont écartées en éventail, afin d'accroître la ventilation et l'isolation. Des registres permettent de régler la quantité d'air fournie par le ventilateur.

La ventilation absorbe de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{4}$ pour 100 de la puissance du transformateur.

Cette construction s'applique jusqu'à des tensions de 15000 et même 20000 volts.

Les transformateurs à courant triphasé, à 20000 volts, de 100 à 200 kilowatts, construits par la Société Alioth pour l'installation de Saint-Georges, desservant Carcassonne et Narbonne, sont isolés à l'air avec ventilation naturelle.

Pour les petits transformateurs à très haute tension, les modes précédents de construction exigeant une assez grande distance entre les enroulements primaire et secondaire donneraient une très médiocre utilisation des matériaux; on est donc conduit à isoler ces transformateurs au moyen d'huile. On fait quelquefois circuler ce liquide au moyen d'une pompe mue par un petit moteur asynchrone qui le refoule dans un serpentin entouré d'eau froide.

Le transformateur étant parfaitement séché à l'étuve, on l'introduit dans une cuve de métal ou de grès, dans laquelle on verse l'huile chaude. Celle-ci, en chassant l'air, exclut toute trace d'humidité. On emploie différentes sortes d'huiles, notamment l'huile de résine, l'huile de vaseline, l'huile de pétrole rectifiée.

L'huile supprime les effluves. Possédant une grande rigi-

Digitized by Google

dité électrostatique, elle permet de rapprocher les enroulements et le noyau. Si, par suite d'une élévation accidentelle de tension, une étincelle venait à jaillir, l'huile l'éteindrait rapidement en obstruant le passage, pourvu toutefois que l'étincelle n'ait pas une intensité capable de décomposer l'huile en formant sur son parcours un filament conducteur.

L'emploi de l'huile permet d'accroître la puissance des gros transformateurs à très haute tension. A cet effet on refroidit l'huile au moyen d'un serpentin monté près de la surface intérieure de la paroi verticale de la cuve, et dans lequel on fait circuler de l'eau froide.

L'huile doit être fluide, de façon qu'elle passe aisément par les canaux forcément étroits. Les matières employées pour l'isolation des enroulements doivent être insolubles dans le liquide, sinon celui-ci s'épaissirait et circulerait difficilement dans les canaux, où l'échauffement pourrait devenir dangereux.

L'huile a été utilisée comme isolant en 1854 par Jean, mécanicien amateur à Paris [1]. Après avoir séché à chaud une bobine d'induction, il acheva la dessiccation dans le vide, puis immergea l'appareil dans l'huile de térébenthine. Il obtint de la sorte un isolement tout à fait supérieur.

Vers la même époque, Poggendorff proposa également l'huile pour l'isolation des bobines d'induction. L'emploi de l'huile a été préconisé depuis par David Brooks, puis par MM. Johnson et Philipps, Brown, par la Compagnie Westinghouse, etc. M. Ferranti a employé l'huile pour ses transformateurs à 10000 volts, et pour remplir les boîtes de jonction des feeders reliant l'usine de Deptford à Londres.

VIII. — *Chute de tension dans les transformateurs.*

La chute de tension aux bornes secondaires d'un transformateur en charge est produite par deux causes :

1° La résistance des deux enroulements, primaire et secondaire;

---

(1) Fleming, *The alternate current transformer*, 1892.

Digitized by Google

2° Les fuites magnétiques, ou la dispersion magnétique.

La perte de tension dans l'enroulement primaire a pour effet de réduire la force contre-électromotrice, et par suite le flux dans le noyau. Il en résulte une réduction de la force électromotrice secondaire; celle-ci, diminuée de la chute de tension dans l'enroulement secondaire, donnerait la tension aux bornes secondaires du transformateur si la dispersion magnétique était nulle.

La chute de tension à pleine charge, due à la résistance des deux enroulements, le transformateur travaillant sur des circuits ne décalant pas le courant, varie d'environ 3 pour 100 pour les petits transformateurs à 1 pour 100 pour les gros transformateurs. Elle est en moyenne 2 pour 100. Ces nombres représenteraient la chute totale de tension à pleine charge si la dispersion magnétique était nulle, c'est-à-dire si la totalité du flux embrassé par l'enroulement primaire traversait l'enroulement secondaire.

Lorsque les appareils récepteurs ou la ligne décalent le courant, la perte de tension due à la résistance des enroulements se trouve diminuée.

En pratique la différence, parfois très grande, entre les potentiels des deux enroulements, ainsi que la ventilation, obligent à séparer les enroulements primaire et secondaire. Les aires embrassées par ces deux enroulements étant différentes, ou bien ces deux séries de bobines ne se trouvant pas aux mêmes points du noyau, les flux qui traversent ces deux organes ne sont en général pas les mêmes, dès que le transformateur est en charge.

Lorsque le transformateur débite sur des résistances sans inductance, le flux actif embrassé par le secondaire est plus petit que celui qui traverse le primaire. Il en résulte que la chute de tension aux bornes secondaires est plus grande que celle qui serait produite par la résistance des deux enroulements.

Lorsque le transformateur travaille sur des récepteurs possédant de l'inductance, ces fuites jouent un rôle encore plus important; la chute de tension aux bornes secondaires est donc encore plus grande, pour un même courant.

La capacité des récepteurs et des canalisations a un effet

Digitized by Google

contraire qui tend à réduire la chute de tension aux bornes secondaires que produisent la résistance des enroulements et les fuites magnétiques lorsque le transformateur alimente des récepteurs sans inductance.

M. Görges [1] a publié les résultats suivants d'essais effectués dans les ateliers de la maison Siemens et Halske sur une série de transformateurs à courant alternatif de 10 kilowatts, $\frac{2000}{120}$ volts, 50 périodes par seconde. Le courant secondaire normal est 85 ampères. La perte totale de tension dans les deux enroulements, à froid, est égale à 1,85 pour 100. Pour un débit de 115 ampères cette perte est 2,53 pour 100.

En fermant le secondaire en court-circuit sur un ampèremètre, la tension aux bornes primaires nécessaire pour faire débiter 115 ampères secondaires était égale à 10,5 pour 100 de la tension normale. En faisant débiter 115 ampères par le secondaire sur une résistance sans inductance, la chute de tension était 5,4 pour 100. Pour le même courant secondaire et pour $\cos\varphi = 0,7$, la chute de tension a été trouvée égale à 10,5 pour 100. Ces chiffres très élevés sont dus en partie à ce que le transformateur était surchargé.

Pour des transformateurs à courant triphasé de 100 kilowatts, destinés à alimenter un réseau de distribution de ville, de bonnes conditions de régulation sont les suivantes :

	En pour 100
Chute de tension à pleine charge pour $\cos\varphi = 1$.....	1,5 à 1,8
Chute de tension à pleine charge pour $\cos\varphi = 0,7$.....	4 à 5
Élévation maximum de température au-dessus de la température ambiante.....	55°

Nous empruntons à M. Kennelly l'étude ci-dessous sur la chute de tension par réactance dans les transformateurs.

Étant donné un transformateur dont le rapport de transformation, à vide, est égal au quotient $\frac{N_2}{N_1}$ des nombres de spires secondaires et primaires, M. Kennelly considère un second transformateur qui ne diffère du premier qu'en ce que le

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift* du 25 avril 1895.

Digitized by Google

nombre des spires secondaires est égal au nombre des spires primaires, le rapport de transformation étant par suite 1 : 1, et le poids de cuivre de l'enroulement secondaire étant le même dans les deux cas. Le courant, la tension et la résistance secondaires du second transformateur s'obtiendront en multipliant le courant secondaire du premier transformateur par $\frac{N_2}{N_1}$, sa tension secondaire par $\frac{N_1}{N_2}$, et sa résistance par $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$.

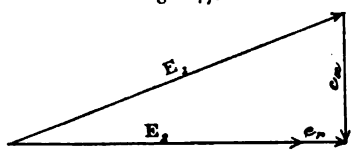
Appelons I le courant primaire, et r la somme de la résistance du primaire et de celle du secondaire obtenue comme nous venons de l'indiquer. Soit E_1 la tension aux bornes primaires, et E_2 la tension aux bornes secondaires du transformateur de niveau. La chute totale de tension par résistance dans le transformateur est

$$e_r = rI. \tag{1}$$

La chute par réactance e_x est normale au courant I, et par suite à e_r.

Dans le cas où les appareils récepteurs ne décalent pas le

Fig. 147.



courant, on a (*fig.* 147)

$$e_x = \sqrt{E_1^2 - (E_2 + e_r)^2} \text{ volts}; \tag{2}$$

e_r peut se déduire du courant et des dimensions des enroulements.

Si les appareils récepteurs retardent ou avancent la phase du courant d'un angle φ, on a (*fig.* 148)

$$e_x = \sqrt{E_1^2 - (E_2 \cos\varphi + e_r)^2} - E_2 \sin\varphi \text{ volts}. \tag{3}$$

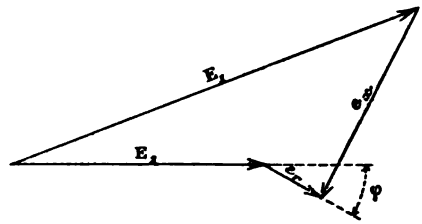
Dans les bons transformateurs travaillant sur des circuits

Digitized by Google

sans inductance ni capacité, E_1 et E_2 diffèrent peu, de telle sorte qu'une petite erreur de mesure peut entraîner une forte erreur dans la détermination de e_x par la formule (2).

Pour un transformateur bien établi, on peut trouver e_r sans calcul, dans le cas de la figure 147, car e_x est alors assez

Fig. 148.



petit pour qu'on ait sensiblement, pour $\cos\varphi = 1$,

$$e_r = E_1 - E_2. \tag{4}$$

Soit ε la chute totale de tension du transformateur en pour 100, pour la charge normale et pour $\cos\varphi = 1$, et $\mathcal{E}$ la chute totale de tension en pour 100, pour une charge inductive avec le même courant normal et un facteur de puissance $\cos\varphi$. On a approximativement

$$\mathcal{E} = \varepsilon \cos\varphi + e_x \sin\varphi. \tag{5}$$

Le rapport $\frac{e_x}{e_r}$ est le *facteur de réactance* f. On a

$$f = \frac{e_x}{e_r} = \frac{\mathcal{E} - \varepsilon\cos\varphi}{\varepsilon\sin\varphi} \tag{6}$$

ou, en posant $\mathcal{E} = k\varepsilon$

$$f = \frac{e_x}{e_r} = k\,\text{coséc}\,\varphi - \cot\varphi. \tag{7}$$

Les relations (5), (6) et (7) ne sont applicables que si la

Digitized by Google

chute de tension et le facteur de réactance ne sont pas considérables.

Exemple I. — Un transformateur a une chute de tension aux bornes secondaires, à pleine charge non inductive, de 0,75 pour 100, et de 1,8 pour 100 à une charge inductive avec même courant et $\cos\varphi = 0,8$. On a donc

$$\cos\varphi = 0,8, \qquad \sin\varphi = 0,6,$$

$$\varepsilon = 0,75,$$

$$\mathcal{E} = 1,8,$$

et par suite

$$f = \frac{1,8 - 0,75 \times 0,8}{0,75 \times 0,6} = 2,67,$$

c'est-à-dire que la chute de tension par réactance e_x est 2,67 fois la chute de tension par résistance e_r.

Exemple II. — Un transformateur de 2250 kilowatts a une tension primaire de 22000 volts et une tension secondaire de 11000 volts à vide; le rapport de transformation est donc 0,5.

A pleine charge non inductive, la tension aux bornes secondaires tombe à 10918 volts, le courant secondaire à pleine charge étant 204 ampères. Pour le même courant, et avec un facteur de puissance mesuré à l'aide d'un wattmètre $\cos\varphi = 0,8$, la tension aux bornes secondaires tombe à 10800 volts.

On a donc

$$E_1 = 22000 \text{ volts}$$

et

$$E_2 = 21836 \text{ volts}$$

avec charge non inductive de 102 ampères; d'où

$$e_r = 22000 - 21836 = 164 \text{ volts.}$$

La résistance totale équivalente est donc

$$r = \frac{164}{102} = 1,608 \text{ ohms.}$$

Digitized by Google

On a encore pour la charge inductive de 102 ampères avec

$$\cos\varphi = 0,8, \qquad \sin\varphi = 0,6,$$

$$E_2 = 21\,600$$

et

$$e_x = \sqrt{22\,000^2 - (21\,600 \times 0,8 + 164)^2} - 21\,600 \times 0,6$$
$$= 445 \text{ volts}$$
$$f = \frac{445}{164} = 2,713.$$

IX. — *Détermination des pertes de puissance dans les transformateurs.*

Pertes de puissance dans les enroulements. — Ces pertes RI^2 se déduisent directement de la résistance de chaque enroulement et du courant correspondant. La résistance des enroulements se calcule d'après les données de construction du transformateur, ou encore se détermine, par exemple, en faisant passer un courant donné et en mesurant la tension correspondante aux bornes.

Pertes de puissance dans le noyau magnétique. — Ces pertes sont de deux sortes :

1° Perte par hystérésis;

2° Perte par courants de Foucault.

La somme de ces deux pertes se détermine directement au moyen du wattmètre, le transformateur fonctionnant à circuit secondaire ouvert.

A induction maximum $\mathfrak{B}$ et température constantes, les pertes de puissance par hystérésis dans le noyau sont proportionnelles à la fréquence n

$$(1) \qquad p_h = \eta \mathfrak{B}^{1,6} n,$$

et les pertes de puissance par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence

$$(2) \qquad p_F = K \mathfrak{B}^2 n^2.$$

Digitized by Google

La perte totale dans le fer, à la fréquence n, est donc

$$(3) \qquad p_n = \eta \mathfrak{B}^{1,6} n + K \mathfrak{B}^2 n^2.$$

Si nous voulons séparer les pertes p_h et p_F, faisons fonctionner le transformateur, à circuit secondaire ouvert, à une autre fréquence n', en conservant la même induction maximum $\mathfrak{B}$, la même température et la même forme de force électromotrice; nous trouverons une nouvelle perte totale

$$(4) \qquad p_{n'} = \eta \mathfrak{B}^{1,6} n' + K \mathfrak{B}^2 n'^2$$

ou

$$(5) \qquad p_{n'} = (\eta \mathfrak{B}^{1,6} n) \frac{n'}{n} + (K \mathfrak{B}^2 n^2) \frac{n'^2}{n^2}.$$

Les deux équations (3) et (5) permettent de déterminer aisément p_h et p_F.

M. C.-F. Scott a imaginé, pour déterminer isolément les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault dans le fer, une autre méthode qui a été appliquée aux transformateurs réducteurs de Buffalo.

La sous-station de Buffalo comprend 7 transformateurs à courant alternatif de 2250 kilowatts, qui reçoivent le courant triphasé à 22000 volts de l'usine du Niagara, et abaissent cette tension à 11000 volts pour la distribution souterraine dans Buffalo. Ces transformateurs forment deux groupes de trois, dont les enroulements primaires, ainsi que les enroulements secondaires, sont montés en triangle. Le septième transformateur constitue réserve.

La construction de ces transformateurs est analogue à celle représentée par la figure 146, sauf qu'ils sont immergés dans l'huile.

La carcasse magnétique est formée de 9 paquets de tôles horizontales, séparés par des cales ménageant une série de canaux pour la circulation de l'huile. Cette carcasse est serrée entre deux flasques de fonte au moyen de 8 tirants verticaux. La flasque inférieure forme le socle du transformateur, et

Digitized by Google

est évidée pour le passage de l'huile. Le noyau central est enveloppé par les bobines verticales plates. Le poids de la carcasse de tôle est de 9500^{kg}.

Le transformateur est enfermé dans une cuve étanche formée d'un cylindre de tôle rivé à sa base sur un fond de fonte, et portant à sa partie supérieure une bride en cornière boulonnée avec le couvercle de fonte. Les 5 bobines secondaires et les 6 bobines primaires sont alternées, et leurs extrémités sont fixées à des bornes portées par deux tablettes de marbre situées à la partie supérieure et noyées dans l'huile. Le couvercle porte deux tampons permettant l'inspection des bornes.

Le refroidissement de l'huile est effectué par quatre serpentins de laiton disposés à l'intérieur de la cuve, au-dessous du niveau de l'huile, et montés en dérivation; ils sont munis de robinets pour le réglage de leur débit. Un tube de verre indique le niveau de l'huile, et un robinet inférieur permet la vidange de la cuve. La température de l'huile est donnée par un thermomètre.

L'induction maximum dans la tôle est d'environ 12 kilogauss, et le flux total maximum de 40 mégamaxwells. La fréquence est 25 périodes par seconde.

Voici les résultats d'expérience pour le rendement, la régulation et l'échauffement de ce transformateur :

Charge pour 100 de la charge normale	150	125	100	75	50	25	10
Rendement pour 100	98,5	98,59	98,63	98,6	98,2	97,2	93,7

Chute de tension à pleine charge non inductive, pour 100	0,76
Chute de tension à pleine charge inductive, $\cos\varphi = 0,8$, pour 100	1,80
Élévation de température, mesurée par l'accroissement de résistance	75°

Une tension de 45000 volts a été appliquée entre les deux enroulements pendant une minute, et une tension de 22500 volts entre l'enroulement secondaire et le noyau également pendant une minute.

Digitized by Google

La résistance des enroulements a été déterminée en mesurant la tension aux bornes nécessaire pour engendrer un courant de 6 ampères environ fourni par une batterie d'accumulateurs de 110 volts réglée par un rhéostat. Si l'on effectue la mesure de la résistance de l'un des enroulements en laissant l'autre ouvert, le courant et la tension aux bornes de l'enroulement en expérience atteignent presque immédiatement leur valeur finale. Mais le courant développe un flux dans le noyau, et des petites variations de ce flux peuvent engendrer des forces électromotrices capables de détériorer les appareils de mesure.

Pour éviter toute variation brusque de ce flux, on ferme en court-circuit le second enroulement, qui joue alors le rôle d'amortisseur. Dans ce cas il s'écoule un temps assez long avant que le flux dans le noyau ait atteint sa valeur finale; la variation de ce flux induit alors dans l'enroulement en expérience une force contre-électromotrice qui s'ajoute à la perte de tension produite par la résistance de cet enroulement, de telle sorte que le quotient de la tension aux bornes par le courant donne une valeur supérieure à la résistance réelle, valeur qui décroît d'une manière continue jusqu'à celle de cette résistance.

Il faut environ 25 à 30 minutes pour obtenir l'état stationnaire lorsque les 5 bobines secondaires sont en quantité, 6 minutes lorsque ces 5 bobines sont en série, et 3 minutes lorsque les bobines primaires sont toutes en série. Puisqu'on emploie toujours le même courant, on obtient dans le dernier cas 10 fois plus d'ampères-tours que dans le premier; par suite, l'aimantation du noyau arrive plus rapidement à son état stationnaire.

Dans ces trois cas le second enroulement est en court-circuit. Si l'on ouvre cet enroulement avant que l'aimantation du noyau ait atteint son état stationnaire, on fait jaillir une étincelle entre les extrémités que l'on sépare.

Voici la méthode de M. Scott. Si on lance dans l'enroulement à basse tension un courant continu, on engendre dans le noyau de fer un flux qui varie avec le courant. Ces variations de flux produisent dans l'enroulement à haute tension une force électromotrice qui peut être mesurée à l'aide d'un

Digitized by Google

voltmètre à courant continu. Si la variation du flux par rapport au temps est constante, on obtient une force électromotrice induite constante qui est accusée par la fixité de l'aiguille du voltmètre.

L'enroulement à basse tension est monté en série avec une batterie d'accumulateurs, un ampèremètre à courant continu, et un rhéostat à liquide qui permet un réglage très exact et continu du courant d'aimantation. L'enroulement à haute tension est fermé sur un voltmètre à grande résistance.

Une variation de l'induction de 6 gauss par seconde produit sur le voltmètre une déviation de 0,1 volt. On fait varier la résistance en série, et par suite le courant d'aimantation, de telle sorte que le voltmètre marque toujours 0,1 volt. En partant du fer non aimanté, on a donc une induction de 6 gauss au bout d'une seconde, de 12 gauss au bout de deux secondes, de 18 gauss après trois secondes, etc. Le temps écoulé après la fermeture du circuit donne donc une mesure de l'induction.

En partant d'un courant égal à zéro, on réduit continuellement la résistance de manière à obtenir une déflexion constante du voltmètre, puis, lorsque l'induction maximum désirée est atteinte, on commute le voltmètre, et l'on fait décroître le courant d'aimantation jusqu'à zéro, puis on renverse celui-ci que l'on fait croître jusqu'à un maximum négatif; on commute de nouveau le voltmètre, et l'on ramène le courant à zéro. On réalise ainsi un cycle complet.

On fait une lecture du courant toutes les 5 secondes, ce qui, avec une déflexion de 0,1 volt, donne des points très rapprochés sur la courbe d'hystérésis obtenue en portant en abscisses les valeurs mesurées i du courant d'aimantation, et en ordonnées les inductions correspondantes. Si le courant et l'induction sont exprimés en unités C.G.S., l'aire de la surface limitée par la courbe, multipliée par le nombre de spires de l'enroulement excitateur et par la section du noyau en centimètres carrés, donne le travail d'hystérésis par cycle, exprimé en ergs.

On commence par faire varier le courant pendant plusieurs cycles pour obtenir la variation normale de l'induction avant de faire les mesures.

Digitized by Google

Cette recherche exige quatre expérimentateurs : l'un manœuvre le rhéostat et observe le voltmètre; un deuxième annonce le temps; un troisième lit l'ampèremètre, et le quatrième inscrit les lectures.

Pour une induction maximum de 10260 gauss, l'aire de la courbe d'hystérésis donne 3958 ergs par cycle, correspondant dans la formule

$$\text{Perte en ergs par centimètre cube et par cycle} = \eta \mathfrak{B}^{1,6}$$

à $\eta = 0,00152$. Pour l'induction maximum de 11980 gauss, on trouve $\eta = 0,001527$.

Le wattmètre a donné, à 25 périodes par seconde :

Perte totale dans le fer, à l'induction de 10260 gauss, 8,51 KW.

Perte totale dans le fer, à l'induction de 11980 gauss, 11 KW.

En retranchant les pertes par hystérésis, on a :

Perte par courants de Foucault pour l'induction de 10260 gauss, 4,09 KW.

Perte par courants de Foucault pour l'induction de 11980 gauss, 5,90 KW.

Le calcul aurait donné dans le second cas :

$$\text{Perte par courants de Foucault } 4,09 \times \frac{\overline{11980}^2}{\overline{10260}^2} = 5,56 \text{ KW}.$$

La différence entre 5,9 et 5,56 est due probablement à la distribution inégale du flux dans la section du noyau.

X. — *Dispositifs de sûreté.*

Si le primaire vient accidentellement en contact avec le secondaire d'un transformateur de distribution, la canalisation secondaire peut devenir dangereuse, car l'isolement de la canalisation primaire peut présenter un défaut, et du reste, dans une distribution étendue, cet isolement n'est jamais absolu. Il est donc indispensable d'empêcher le secondaire de prendre un potentiel élevé.

Digitized by Google

Le procédé consistant à mettre continuellement à la terre, par l'intermédiaire d'une résistance telle que des lampes à incandescence en série, un point de l'enroulement secondaire, le milieu de cet enroulement par exemple, dans le cas d'un transformateur à courant alternatif, est évidemment défectueux au point de vue de la distribution secondaire, mais il est en outre préjudiciable au fonctionnement des téléphones situés dans le voisinage.

L'appareil de sûreté El. Thomson réalise cette mise à la terre seulement lorsqu'il y a contact fortuit entre les deux enroulements. Un bloc rectangulaire de laiton est relié au milieu de l'enroulement secondaire du transformateur à courant alternatif ou au centre de l'étoile du transformateur à courant triphasé. Un ressort connecté à la terre appuie sur ce bloc par l'intermédiaire d'une feuille mince de papier isolant. Ce papier résiste parfaitement à la tension secondaire, mais il est percé par une tension par exemple trois ou quatre fois supérieure, auquel cas le bloc se trouve de la sorte mis à la terre.

Le papier a l'inconvénient d'être sujet à absorber l'humidité, et de ne plus résister alors à la tension secondaire. L'appareil risque donc de fonctionner d'une manière intempestive. La maison Siemens et Halske a créé une variante de ce dispositif qui consiste, en principe, en deux pièces de laiton reliées, l'une à l'enroulement secondaire, l'autre à la terre, et dont les deux surfaces planes, circulaires, en regard, sont séparées par un disque mince de mica percé de trous. L'épaisseur de ce disque est telle qu'il isole les deux pièces de laiton pour la tension normale. Si la tension devient notablement supérieure, un arc jaillit entre les deux pièces en traversant la mince couche d'air des trous du disque, mettant ainsi l'enroulement secondaire à la terre.

L'appareil Cardew se compose de deux disques de laiton parallèles, isolés entre eux par un anneau d'ébonite. Le disque supérieur est relié à l'enroulement secondaire, et le disque inférieur est mis à la terre. Sur le fond de cette sorte de boîte repose une mince lame d'aluminium dont l'une des extrémités est arrêtée. S'il y a contact entre les enroulements primaire et secondaire, le disque supérieur, se trouvant alors

Digitized by Google

à un potentiel élevé, attire l'extrémité libre de la lame d'aluminium qui le met à la terre.

D'après les règlements, toutes les parties accessibles des transformateurs doivent être mises à la terre. L'isolement entre leurs enroulements, ainsi qu'entre le primaire et la terre, ne doit jamais être inférieur à 100 mégohms à la température de 15°, et de 10 mégohms à 70°.

XI. — *Transformateurs divers.*

Transformateur A. Potier. — Voici la description de cet appareil donnée par M. E. Hospitalier [1] :

« Concevons un moteur à courants alternatifs simples à induit fermé sur lui-même, tournant à sa vitesse angulaire normale. Cet induit développe dans l'inducteur un champ tournant avec la même fréquence. Si nous munissons l'inducteur d'un second enroulement régulièrement réparti sur toute la périphérie de cet inducteur, et que nous établissions trois dérivations à 120° l'une de l'autre sur cet enroulement, nous pourrons recueillir des courants triphasés résultant de la transformation du courant alternatif simple qui provoque la rotation de l'induit et crée ainsi le champ tournant.

» La même disposition permet, par un simple changement d'attache des fils sur le circuit secondaire, de transformer un courant alternatif simple en courants alternatifs diphasés. »

L'enroulement primaire peut évidemment recevoir, au lieu d'un courant alternatif, un courant diphasé ou triphasé. Ce dispositif permet donc de transformer un courant alternatif ou polyphasé en un courant alternatif ou en courant polyphasé d'ordre et de tension quelconques.

Considérons encore un moteur à courant alternatif, asynchrone, dont l'inducteur est, par exemple, un anneau Gramme

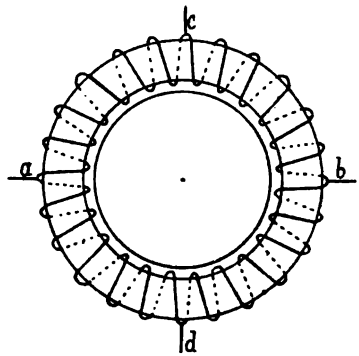
---

(1) *L'Industrie électrique*, n° 105, 10 mai 1896, page 197.

Digitized by Google

(*fig.* 149) recevant un courant alternatif en *a* et *b*. Lorsque l'induit en court-circuit tourne, on obtient, entre les points *c* et *d*, aux extrémités d'un diamètre perpendiculaire à *ab*, une

Fig. 149.



force électromotrice différant en phase d'un quart de période avec la tension primaire entre *a* et *b*.

Si la tension efficace entre *a* et *b* est égale à 100 volts, un voltmètre monté entre *a* et *c*, par exemple, indiquera 70 volts.

§ II. — Transformateurs rotatifs. — Changeurs de fréquence.

I. — *Transformateurs rotatifs.*

Nous réservons pour le Chapitre suivant l'étude de la transformation des courants polyphasés en courant continu, et réciproquement.

La transformation d'un courant polyphasé en un autre courant polyphasé, de tension, de fréquence et d'ordre quelconques, peut évidemment être obtenue à l'aide d'une génératrice appropriée actionnée par un moteur recevant le courant à transformer. Si la fréquence du courant secondaire doit être invariable, le moteur sera évidemment synchrone. Le rendement total du groupe est égal au produit des rendements des deux organes.

Digitized by Google

Nous avons vu que la transformation d'un courant polyphasé en un autre courant polyphasé de même fréquence et de tension quelconque s'obtient aisément à l'aide de transformateurs immobiles dont le rendement est très élevé, le coût relativement modéré, et ne demandant qu'une surveillance presque insignifiante. Nous avons encore montré que ces appareils permettent la transformation d'un courant triphasé en courant diphasé de même fréquence et de tension quelconque, et inversement. La transformation par appareils rotatifs ne présente donc d'intérêt que dans les cas spéciaux où l'on a à transformer un courant polyphasé en courant alternatif simple, ou réciproquement, ou bien à transformer un courant polyphasé en un autre courant polyphasé de fréquence différente, d'ordre et de tension quelconques.

II. — *Changeurs de fréquence.*

Dans un certain nombre d'installations, la nature des appareils récepteurs, ou encore la valeur élevée de l'inductance des longues lignes primaires, ont conduit à adopter une fréquence de 25 périodes par seconde. On a même proposé pour la traction directe par courants polyphasés une fréquence de 15 périodes par seconde, pour permettre de caler directement les moteurs asynchrones sur les essieux des voitures ou des locomotives, et pour réduire la perte de tension dans les rails.

Le bon fonctionnement des lampes à incandescence exigeant une fréquence d'au moins 30 à 40 périodes par seconde, et celui des lampes à arc 40 à 60 périodes par seconde, on alimente, dans les distributions à faible fréquence, les réseaux d'éclairage au moyen de *changeurs de fréquence.* Ces appareils permettent de changer non seulement la fréquence, mais encore la tension et l'ordre d'un courant polyphasé. Ainsi, un tel appareil peut transformer un courant triphasé de 10000 volts, 20 périodes par seconde, en un courant alternatif simple de 500 volts, 50 périodes par seconde.

Changeur de fréquence de Buffalo. — L'une des stations

Digitized by Google

transformatrices de Buffalo comprend trois changeurs de fréquence de 500 kilowatts.

Chacun de ces appareils est constitué par un moteur synchrone recevant le courant triphasé à 2200 volts et 25 périodes par seconde, et dont l'inducteur, à 8 pôles, faisant 375 tours par minute, est manchonné avec l'arbre d'une génératrice produisant un courant diphasé de 500 kilowatts à 2200 volts. L'inducteur mobile porte 20 pôles; la fréquence du courant diphasé est donc

$$25 \times \frac{20}{8} = 62,5 \text{ périodes par seconde.}$$

Les pôles de la génératrice correspondent de 5 en 5 aux pôles du moteur. Celui-ci pouvant être synchronisé sur un pôle quelconque, un commutateur permet, le cas échéant, de faire glisser le moteur d'un pôle, afin d'obtenir la synchronisation sur les pôles convenables.

Changeur de fréquence Stanley. — La disposition générale est analogue à celle de la génératrice Stanley à fer tournant, à deux induits fixes, et à bobine inductrice immobile. Les noyaux de tôle des armatures portent des cannelures ouvertes, droites, dans lesquelles sont logées les bobines construites préalablement sur forme. L'une des armatures reçoit le courant à transformer, et constitue par conséquent l'organe moteur du changeur de fréquence. L'enroulement du second induit fournit le courant transformé.

La pièce tournante est un cylindre d'acier portant à ses extrémités deux couronnes de tôle munies de fortes dents formant projections polaires, ou bien encore les extrémités seules de ces pôles peuvent être laminées.

Ce dispositif permet évidemment d'obtenir simultanément un changement de fréquence, de tension, et d'ordre d'un courant polyphasé. Par exemple, il peut transformer un courant triphasé de 5000 volts, 25 périodes par seconde, en un courant diphasé de 1000 volts, 50 périodes par seconde.

Si la dispersion et les réactions d'induits étaient nulles, le rapport de transformation, pour une machine donnée, serait déterminé et ne dépendrait que des nombres de spires pri-

Digitized by Google

maires et secondaires. Les réactions d'induits et la dispersion permettent cependant de faire varier la tension secondaire entre certaines limites par le réglage du courant d'excitation.

Changeur de fréquence de Brooklyn. — Considérons un moteur asynchrone. La fréquence du courant dans l'induit est égale au produit σn du glissement relatif σ par la fréquence n du courant primaire. Si l'on cale l'induit, on a $\sigma = 1$, et la fréquence du courant secondaire est n, c'est-à-dire est égale à la fréquence du courant primaire.

Si l'on entraîne l'induit en sens inverse de la rotation du champ, σ est supérieur à 1; si par exemple $\sigma = 2$, la fréquence du courant secondaire est $2n$.

Lorsque l'induit est calé, $\sigma = 1$, le moteur se comporte comme un transformateur statique ayant une grande dispersion due à l'entrefer et à la position relative des enroulements. Le rapport de transformation est égal au rapport des nombres de spires secondaires et primaires.

Si les nombres de spires primaires et secondaires sont égaux, le rapport de transformation est égal à l'unité. Dans cette hypothèse, considérons une seule section polyphasée, et soient I le courant et E_1 la tension primaires. Le courant secondaire sera donc aussi égal à I, et la tension secondaire

$$E_2 = \sigma E_1.$$

La puissance primaire est $E_1 I$, et la puissance secondaire $\sigma E_1 I$. La différence $\sigma E_1 I - E_1 I$ est fournie par le moteur actionnant le changeur de fréquence. Ce moteur est en général synchrone, afin que la fréquence σn du courant secondaire soit invariable. Le rôle du moteur synchrone est donc de produire l'accroissement de tension $\sigma E_1 - E_1$ du courant I, en développant la puissance $(\sigma E_1 - E_1)$ I.

Des considérations qui précèdent on peut tirer les conclusions suivantes, les courants primaire et secondaire étant supposés de même ordre :

L'inducteur du changeur de fréquence, au point de vue de l'échauffement de ses fils, de l'hystérésis et des courants de Foucault, doit avoir, par section, une puissance $E_1 I$ augmentée des pertes intérieures de cet organe. L'induit du

Digitized by Google

changeur de fréquence sera établi pour le courant I et la tension σI_1, par section, à la fréquence σn; sa puissance doit donc être égale à celle de l'armature d'une génératrice de puissance $\sigma E_1 I$ à la fréquence σn, tandis que les pertes dans le fer de l'induit d'un moteur asynchrone sont insignifiantes.

La puissance sur l'arbre du moteur synchrone est égale à $\sigma E_1 I - E_1 I$, plus les pertes dans l'induit du changeur de fréquence; cette puissance augmentée des pertes dans le moteur donnera la puissance aux bornes de ce dernier.

Exemple. — Soit un changeur de fréquence de 25 à 62,5 périodes par seconde, fournissant 100 kilowatts à ses bornes secondaires. La puissance de l'inducteur du changeur de fréquence sera égale à celle d'un moteur asynchrone de 40 kilowatts; l'induit aura une puissance de 100 kilowatts à 62,5 périodes par seconde. La puissance sur l'arbre du moteur synchrone sera 60 kilowatts.

On peut ajuster l'excitation du champ du moteur synchrone de telle sorte que ce moteur produise une composante du courant en avance, sensiblement égale à la composante en retard du courant aux bornes de l'inducteur du changeur. On peut donc de cette façon obtenir une valeur très élevée pour le facteur de puissance externe du système.

Les changeurs de fréquence de Brooklyn transforment le courant triphasé à 25 périodes par seconde en courant diphasé à 62,5 périodes par seconde. Ils font 750 tours par minute. Le moteur synchrone a 4 pôles, le moteur asynchrone 6 pôles. La vitesse relative de l'induit et du champ est

$$500 + 750 = 1250 \text{ tours par minute.}$$

Digitized by Google

CHAPITRE V.

CONVERSION DES COURANTS POLYPHASÉS EN COURANT CONTINU ET RÉCIPROQUEMENT.

CONVERTISSEURS.

§ I. — Transformation au moyen de deux machines.

Le procédé le plus élémentaire pour transformer un courant polyphasé en courant continu consiste à actionner une dynamo à courant continu au moyen d'un moteur à courant polyphasé, synchrone ou asynchrone. Le moteur asynchrone démarre plus aisément que le moteur synchrone, mais celui-ci assure à la dynamo une vitesse plus constante, qui ne dépend que de la fréquence du courant à transformer, tandis que la vitesse du moteur asynchrone diminue légèrement, la fréquence du courant polyphasé restant constante, au fur et à mesure que la charge de la dynamo augmente. En outre, le moteur d'induction donne naissance à une composante en retard du courant qui charge la distribution. On adopte donc en général le moteur synchrone.

Ce dispositif, exigeant deux machines qui représentent ensemble deux fois la puissance aux bornes secondaires plus les pertes, et transformant la totalité de la puissance primaire au moyen de deux machines tournantes, est naturellement assez coûteux et son rendement n'est pas très élevé. Le prix d'installation d'un tel groupe est d'environ 20 pour 100 plus élevé que pour un convertisseur avec son transformateur. Dans le cas d'une unité de 200 kilowatts, on peut compter pour le rendement du moteur synchrone 94 pour 100, et pour celui de la dynamo 92 pour 100, d'où résulte un rendement total de 86,5 pour 100. Le rendement d'un transformateur de

Digitized by Google

200 kilowatts est d'environ 97 pour 100, et le rendement du convertisseur 93 à 94 pour 100 suivant la tension du courant continu. Le rendement total est donc en moyenne de 91 pour 100. Ces rendements se rapportent à la pleine charge.

Les moteurs à courant polyphasé peuvent être construits pour une tension élevée, 10000 volts par exemple. Le groupe moteur-génératrice ne demande donc pas, dans la plupart des cas, de transformateur.

Ce dispositif permet le réglage indépendant du courant primaire et du courant secondaire. Par exemple, si un moteur à courant triphasé actionne une dynamo chargeant des accumulateurs, on fera varier la tension de la dynamo simplement par la manœuvre du rhéostat d'excitation. Si le moteur commande une génératrice de tramway, celle-ci pourra être compoundée et même surcompoundée.

Par contre, la réaction d'armature du convertisseur à courant polyphasé étant très faible, cette machine possède une grande régulation, et du reste elle peut être compoundée.

La construction d'un convertisseur pour une fréquence supérieure à 25 périodes par seconde présente des difficultés particulièrement en raison du grand nombre de pôles. Dans les installations où la fréquence est élevée, le groupe moteur-génératrice peut donc être préférable au convertisseur.

Si l'on veut transformer un courant continu en courant polyphasé ou alternatif, au moyen d'un moteur à courant continu actionnant une génératrice de courant polyphasé ou de courant alternatif, on devra, pour assurer la constance de la fréquence, maintenir invariable la vitesse du moteur.

L'installation faite à Budapest par la maison Schuckert comprend une série de transformateurs de 120 et de 240 kilowatts, formés chacun d'un moteur synchrone à courant diphasé actionnant une génératrice de courant continu. Les moteurs sont analogues à des dynamos multipolaires à courant continu, à pôles extérieurs, et dont l'anneau, du type Gramme, à enroulement continu, reçoit, par l'intermédiaire de quatre bagues, le courant diphasé d'environ 1800 volts, à la fréquence de 26 périodes par seconde. Les génératrices de

Digitized by Google

courant continu alimentent un réseau à trois fils, avec réglage au moyen d'une batterie d'accumulateurs.

Avant de fermer les transformateurs sur la ligne primaire, on les amène au synchronisme en faisant agir les accumulateurs sur les dynamos à courant continu.

L'usine de Folsom transmet l'énergie d'une chute sous forme de courant triphasé de 11500 volts à Sacramento (Californie). Dans cette ville, une série de transformateurs formés chacun d'un moteur à courant triphasé accouplé à une dynamo à courant continu fournissent l'énergie pour l'éclairage et pour les tramways.

L'usine génératrice des tramways de Dublin (Irlande) produit un courant triphasé de 2300 à 2500 volts, à la fréquence de 30 périodes par seconde. L'énergie est distribuée à deux sous-stations comportant chacune deux transformateurs de 60 kilowatts disponibles. Ces transformateurs se composent d'un moteur synchrone à six pôles, accouplé à une génératrice de courant continu à quatre pôles. Le moteur reçoit le courant triphasé de 2300 volts, et la dynamo fournit un courant continu de 500 à 550 volts; ces transformateurs font 600 tours par minute.

§ II. — Transformateurs rotatifs a double enroulement.

Considérons une machine analogue à une dynamo à courant continu, formée d'un anneau Gramme mobile entre une ou plusieurs paires de pôles excités par un courant continu. Relions deux, trois, quatre points de l'enroulement mobile correspondant à des différences de phases d'une demi-période, d'un tiers ou d'un quart de période, à autant de bagues auxquelles des balais amènent le courant alternatif ou polyphasé à transformer. Dans le cas où la machine est multipolaire, les nombres de points reliés aux bagues sont multipliés par le nombre de paires de pôles.

Un intervalle suffisant ayant été réservé entre la partie tournante et les pièces polaires, appliquons sur le premier

Digitized by Google

enroulement un second enroulement, Gramme par exemple, dont un certain nombre de points convenablement choisis seront reliés à une seconde série de bagues ou à un collecteur de dynamo à courant continu.

La machine, avec son premier enroulement, constitue un moteur synchrone à courant alternatif ou polyphasé. Lorsque la partie tournante aura atteint le synchronisme et que les électros seront excités, le moteur pourra être chargé, et le second enroulement deviendra générateur de courant alternatif, polyphasé ou continu. L'appareil sera donc un transformateur. Les courants primaire et secondaire, alternatifs ou polyphasés, auront même fréquence.

Ce type de transformateur possède les propriétés suivantes :

Il permet de transformer un courant de nature et de tension quelconques en un autre courant de nature et de tension également quelconques. La faible distance des enroulements et les difficultés d'isolation limitent en général la tension maximum à une valeur beaucoup moins élevée que pour les transformateurs précédents.

Les enroulements moteur et générateur tournant ensemble dans un champ commun, le rapport des tensions secondaire et primaire est sensiblement constant, quelle que soit l'excitation des électros : les écarts qui se manifestent sont produits par la résistance des enroulements et par la dispersion magnétique due à ce que les enroulements primaire et secondaire sont à une certaine distance l'un de l'autre, et à ce que la répartition du courant aux divers points de ces deux enroulements, à chaque instant, est en général différente, à moins que les deux courants ne soient de même ordre.

Ces machines ont en général pour objet de transformer un courant polyphasé en courant continu. Le réglage de la tension du courant continu ne pourra donc pas être réalisé en agissant sur l'excitation des électros; il faudra faire varier la tension du courant polyphasé aux bornes du transformateur rotatif.

Pour des raisons que nous exposerons à propos des moteurs synchrones, il peut être avantageux d'accroître l'*excitation* des électros à mesure que la puissance fournie par le

Digitized by Google

transformateur augmente. Ce résultat s'obtient automatiquement par compoundage, c'est-à-dire en faisant passer le courant continu total autour des électros; mais l'accroissement du champ produit par cette excitation supplémentaire est faible par rapport à celui qui se manifesterait si la même machine était employée comme simple dynamo à courant continu.

Le transformateur rotatif de courant polyphasé en courant continu démarre automatiquement à vide. Le circuit secondaire étant ouvert, et l'excitation coupée, on lance le courant polyphasé; la machine prend un mouvement accéléré que l'on contrôle au moyen de lampes ou d'un voltmètre montés entre les bornes des électros. Au fur et à mesure que la vitesse augmente, les lampes éclairent de moins en moins et donnent des battements de lumière d'une durée de plus en plus longue. Lorsque le synchronisme est atteint, les lampes sont éteintes et le voltmètre marque zéro. On excite alors les électros et l'on ferme le secondaire sur le circuit extérieur.

L'excitation du champ est prise naturellement en dérivation sur les balais du collecteur.

Pour éviter la grande intensité due au retard de phase du courant à la mise en marche, on peut employer un transformateur spécial de démarrage. Lorsque, le synchronisme étant atteint, on ferme le circuit inducteur sur le collecteur, le courant polyphasé diminue brusquement.

Le synchronisme peut se produire sur l'une quelconque des deux moitiés d'une période. Il en résulte que la polarité des balais du collecteur peut varier aux mises en marche; il est donc nécessaire de placer un commutateur sur le courant continu.

Le transformateur rotatif de courant alternatif en courant continu ne démarre pas automatiquement, ce qui, pour des machines puissantes, est un inconvénient notable. La réaction du courant primaire sur le champ est pulsatoire; le nombre de ces pulsations est double de la fréquence du courant alternatif; la machine ne se trouve donc pas dans des conditions favorables au point de vue de l'absence d'étincelles au collecteur. Aussi préfère-t-on souvent employer un moteur à courant alternatif accouplé à une dynamo à courant continu.

Digitized by Google

Un transformateur rotatif pourrait être utilisé pour transformer un courant continu en courant polyphasé ou alternatif; mais la vitesse de la machine, et par conséquent la fréquence du courant secondaire, ne seraient pas invariables. Si, en effet, on venait à mettre subitement sur le secondaire une forte charge inductive produisant un retard de phase du courant, celui-ci réagissant sur le champ diminuerait son intensité, et par suite la machine s'emballerait rapidement. Pour ramener la vitesse à sa valeur normale, il faudrait accroître l'excitation des électros.

Dans le cas d'un transformateur rotatif de courant triphasé en courant continu, il est plus avantageux de monter le primaire en étoile, au lieu d'adopter l'enroulement continu ou en triangle, ainsi que nous l'avons vu à propos des génératrices de courant triphasé.

Pour le calcul de ces transformateurs, on se reportera à l'étude que nous avons exposée plus haut des machines à courant polyphasé.

Le transformateur Lahmeyer de courant triphasé en courant continu est une modification du transformateur à courant continu de ce constructeur. Un tambour denté tourne à l'intérieur d'un inducteur à quatre pôles. Ce tambour porte deux enroulements connectés, l'un à trois bagues, l'autre à un collecteur à lames, ces deux organes étant disposés de part et d'autre de l'armature. Les bobines primaires, en fil fin, sont logées au fond des cannelures; l'enroulement secondaire engendrant le courant de basse tension est superposé au premier et occupe la partie supérieure des cannelures.

Il est très important de rendre impossible l'irruption du courant de haute tension dans le circuit de basse tension, soit par suite d'un contact entre les deux enroulements, soit par suite de la production d'une étincelle entre les deux séries de bobines. A cet effet, on loge dans chaque cannelure, entre les deux bobines primaire et secondaire, une lame de cuivre isolée sur ses deux faces et faisant saillie en dehors de la cannelure. Sur l'une des joues de l'armature on interpose, entre les deux enroulements, un double tissu de cuivre relié électriquement aux lames de cuivre des cannelures; sur

Digitized by Google

l'autre joue on interpose également, entre les deux enroulements, une calotte de toile métallique identique à la première, mais isolée des lames de cuivre. Ces deux parties d'enveloppe protectrice composées, l'une d'une calotte de toile métallique et des lames de cuivre, l'autre d'une simple calotte de toile métallique, sont reliées individuellement à la masse de la machine, et par suite se trouvent mises à la terre. L'isolation ménagée entre ces deux parties a évidemment pour but d'éviter la production de courants dans les lames de cuivre. Le circuit secondaire se trouve de la sorte parfaitement protégé contre le courant de haute tension.

L'une des premières applications de ce transformateur a été faite à la distribution d'énergie de Bockenheim, où des transformateurs rotatifs Lahmeyer, de 30 kilowatts, reçoivent un courant triphasé de 600 volts, 40 périodes par seconde, et fournissent un courant continu de 270 ampères à 110 volts.

§ III. — Transformateurs rotatifs a enroulement unique ou convertisseurs.

I. — *Principe et forces électromotrices des convertisseurs.*

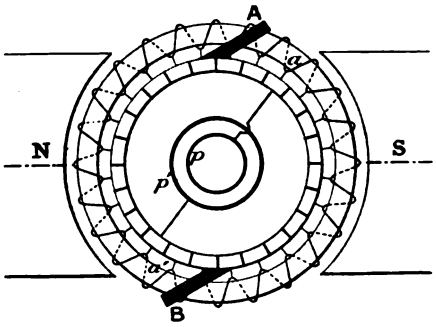
Considérons une machine à courant continu formée par exemple d'un anneau Gramme muni de son commutateur ordinaire, et tournant entre deux pôles inducteurs excités par un courant continu. Relions deux points a, a' de l'enroulement de l'armature (*fig.* 150), diamétralement opposés, et correspondant par suite à une différence de phase d'une demi-période, à deux bagues métalliques isolées p, p', calées sur l'arbre, auxquelles deux balais amèneront un courant alternatif. L'enroulement des électro-aimants étant coupé, et les balais du commutateur à circuit ouvert, imprimons à l'armature un mouvement de rotation accéléré jusqu'à ce que la vitesse ait atteint la valeur correspondant au synchronisme, puis relions les balais du collecteur à bagues à la source de courant alternatif. Si nous excitons alors les électros, la machine est capable de produire une puissance

Digitized by Google

mécanique, et constitue par suite un *moteur synchrone*.

L'anneau tournant dans un champ magnétique engendrera entre les balais de son commutateur à lames la même ten-

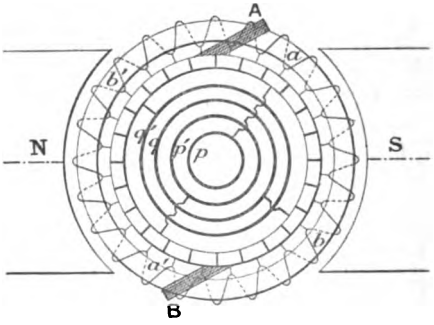
Fig. 150.



sion continue que s'il était entraîné mécaniquement avec la même vitesse dans le même champ magnétique. On pourra donc recueillir un courant continu aux balais du commutateur.

Relions encore deux points b, b' de l'enroulement, distants

Fig. 151.



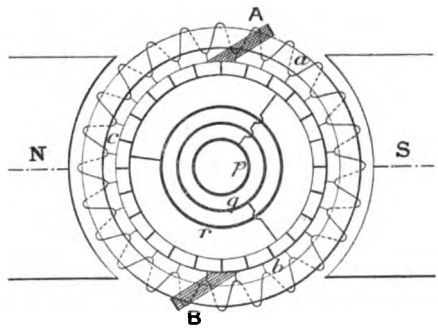
de 90° des points a, a', à une seconde paire de bagues métalliques isolées q, q', munies de balais (*fig.* 151). Si, l'enroule-

Digitized by Google

ment des électros étant coupé, et les balais du commutateur à circuit ouvert, nous relions les deux paires de bagues p, p' et q, q' aux deux sections d'une canalisation à courant diphasé, l'armature se mettra automatiquement en mouvement, et sa vitesse croîtra jusqu'à ce que le synchronisme soit atteint. En excitant alors les électros nous aurons un moteur synchrone à courant diphasé, et nous pourrons encore recueillir un courant continu aux balais du commutateur.

La figure 152 représente la même machine portant trois bagues métalliques isolées, connectées à trois points de l'enroulement de l'armature distants de 120°. Un courant triphasé

Fig. 152.



amené à ces trois bagues fait démarrer l'armature, dont la vitesse croît jusqu'au synchronisme. La machine constitue donc un moteur synchrone à courant triphasé, et elle peut en outre fournir un courant continu aux balais du commutateur.

Les inducteurs de ces machines sont excités par une dérivation prise aux balais du commutateur.

La force électromotrice primaire et la force électromotrice du courant continu sont proportionnelles au champ et à la vitesse; ces deux facteurs étant communs, le rapport de la tension du courant primaire à la tension du courant continu, à vide, est déterminé pour une machine donnée. Nous

Digitized by Google

verrons du reste que ce rapport varie très peu avec la cha ge

Lorsque, comme c'est généralement le cas dans la pratique, la puissance du convertisseur est notablement inférieure à la puissance totale des génératrices en fonctionnement, et qu'en outre la perte dans les canalisations n'est pas très élevée et la réactance des transformateurs peu considérable, le convertisseur ne peut modifier que dans une faible mesure la forme de la tension à ses bornes. Du reste la distribution de l'enroulement sur toute la périphérie de l'armature tend à donner à la force électromotrice un caractère voisin de la forme sinusoïdale. Nous admettrons donc dans cette étude que la tension fournie par les génératrices, et par suite aussi la tension aux bornes du convertisseur, sont sinusoïdales.

Si la forme et les dimensions des pièces polaires du convertisseur sont telles que la force électromotrice que produirait cette machine comme génératrice n'est pas sinusoïdale, un courant d'égalisation, sans puissance, prendra naissance, dont la forme pourra être très différente d'une sinusoïde, et dont la fréquence pourra différer de celle de la tension primaire, courant qui modifiera la répartition du flux actif dans l'entrefer de façon à donner la forme sinusoïdale à la force électromotrice du convertisseur, abstraction faite des pertes intérieures.

Nous avons vu, à propos des génératrices, que, dans l'hypothèse d'une induction sinusoïdale, la force électromotrice efficace entre deux points consécutifs de connexion d'un enroulement fermé avec un collecteur à m bagues est (équation 9, p. 29)

$$E' = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m}.$$

Si les balais du commutateur sont calés suivant la ligne neutre, ce qui est toujours le cas pour les convertisseurs, E_c est la force électromotrice du courant continu du convertisseur.

La colonne 6 du Tableau de la page 101 donne le rapport $\frac{E'}{E_c}$

Digitized by Google

pour différents nombres de phases; nous reproduisons ci-dessous ces rapports :

ORDRE DU COURANT.	RAPPORT $\frac{E'}{E_c}$.
Courant continu	1,00
Courant alternatif simple $m = 2$	0,707
Courant diphasé $m = 4$	0,5
Courant triphasé $m = 3$	0,612
Courant hexaphasé $m = 6$	0,3535
Courant à 12 phases $m = 12$	0,183

Pour les nombres pairs de phases, la force électromotrice maximum entre deux bagues connectées à deux points diamétralement opposés de l'armature est E_c, et la force électromotrice efficace est 0,707 E_c.

Nous allons étudier successivement les convertisseurs à courant alternatif simple, à courant diphasé, à courant triphasé, et enfin ceux à courant hexaphasé. Nous adoptons le principe de la méthode appliquée par MM. Woodbridge et Child à l'étude des convertisseurs à courant alternatif simple et à courant diphasé.

II. — *Convertisseur à courant alternatif simple.*

Considérons une machine à courant continu à deux pôles (*fig.* 153), et soient A et B les balais positif et négatif du commutateur à lames, que nous supposons calés suivant la ligne AB perpendiculaire à l'axe NS des pôles. Relions deux points a, a' de l'enroulement de l'armature, diamétralement opposés, à deux bagues métalliques isolées p, p', auxquelles deux balais amènent le courant alternatif de tension efficace E' et de fréquence n.

Nous venons de voir que, lorsque l'armature est amenée à la vitesse du synchronisme, la machine constitue un moteur synchrone, et que, à vide, la tension maximum entre les bagues p, p' est égale à la tension E_c entre les balais A, B, et

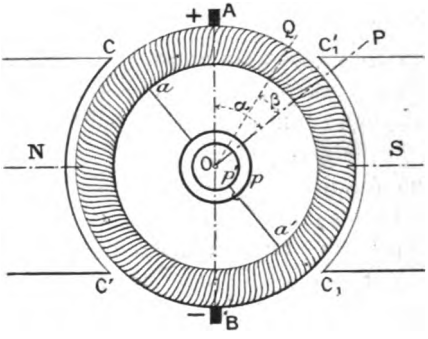
Digitized by Google

par suite que la tension efficace E′ entre les bagues p, p' est

$$(1) \qquad E' = \frac{E_c}{\sqrt{2}} = 0,707 E_c.$$

La tension à l'instant t entre les bagues p, p' est proportionnelle au sinus de l'angle α que fait l'axe OP de la section aPa' avec la ligne neutre OA. La tension entre p et p' est donc nulle quand OP coïncide avec OA; elle croît lorsque OP se déplace de OA vers OS, devient maximum et égale à E_c

Fig. 153.



lorsque P se trouve en regard de S; puis, l'armature continuant à tourner, cette tension diminue, s'annule quand OP arrive en OB, devient ensuite négative et passe par un maximum lorsque P est en regard de N, puis diminue en valeur absolue et s'annule de nouveau quand OP revient à sa position initiale OA.

La tension entre les bagues p, p' a donc pour expression

$$(2) \qquad e = E_c \sin\alpha.$$

Admettons tout d'abord que le courant alternatif coïncide en phase avec la tension aux bagues p, p'. Le courant alternatif est donc nul à l'instant où OP est suivant OA, est dirigé de a vers a' lorsque OP se déplace de OA vers OS, position pour laquelle il devient maximum, s'annule quand OP coïncide avec OB, puis change de signe, c'est-à-dire circule de a'

Digitized by Google

vers a tandis que OP effectue la demi-révolution BNA en passant par un maximum lorsque OP est suivant ON.

Appelons J le courant efficace qui circulerait dans chaque conducteur de l'armature si la machine, fonctionnant comme moteur synchrone, absorbait la puissance P.

Si nous fermons les balais A, B sur un circuit, nous recueillerons à ces balais un courant continu 2I dont chaque moitié sera fournie par l'un des demi-enroulements AB, le sens de ce courant dans l'armature étant suivant BA.

Considérons une bobine Q de la section aPa', située à droite de AB et à une distance angulaire β de OP; soit r la résistance de cette bobine.

Le courant résultant qui traverse la bobine Q à l'instant t est évidemment, en adoptant comme sens positif celui du courant continu,

$$(3) \qquad i = I - J\sqrt{2}\sin\alpha.$$

Si nous négligeons les pertes intérieures du convertisseur, c'est-à-dire si nous admettons que le rendement de cette machine est égal à l'unité, nous devrons avoir

$$(4) \qquad P = 2JE' = 2IE_c$$

ou, en vertu de la relation (1),

$$(5) \qquad J = I\sqrt{2}.$$

Le courant résultant dans la bobine Q a donc pour expression

$$(6) \qquad i = I(1 - 2\sin\alpha)$$

et la perte de puissance dans cette bobine, à l'instant t, est

$$(7) \qquad ri^2 = rI^2(1 - 2\sin\alpha)^2.$$

Si nous considérons une seconde position de la bobine Q diamétralement opposée à la première, nous voyons qu'en adoptant encore comme sens positif le sens du courant continu, la résultante des courants qui parcourent cette bobine est la même que dans la première position. Il suffit donc, pour obtenir la perte moyenne de puissance dans la bobine Q,

Digitized by Google

de calculer la perte d'énergie dans cette bobine pendant son déplacement de A en B, et de multiplier le résultat par le double de la fréquence.

Il est à observer que les relations (3), (6) et (7) ne s'appliquent que pour les positions de Q d'un même côté de la ligne AB, c'est-à-dire pour les valeurs de α comprises entre β et $\pi + \beta$.

En remarquant que l'on a

$$\alpha = 2\pi n t$$

et, par suite,

$$dt = \frac{d\alpha}{2\pi n},$$

la perte moyenne de puissance dans la bobine Q est

$$(8) \quad \left\{ \begin{aligned} \zeta &= 2n \int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} r I^2 (1 - 2\sin\alpha)^2 dt \\ &= r I^2 \frac{1}{\pi} \int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} (1 - 4\sin\alpha + 4\sin^2\alpha) d\alpha, \end{aligned} \right.$$

$$(9) \qquad \zeta = r I^2 \left(3 - \frac{8}{\pi}\cos\beta\right).$$

Posons

$$(10) \qquad \gamma_\beta = 3 - \frac{8}{\pi}\cos\beta = 3 - 2{,}5465\cos\beta;$$

γ_β est le rapport de la perte de puissance dans la bobine Q du convertisseur située à une distance angulaire β du milieu de la section aPa' à la perte de puissance qui aurait lieu dans cette même bobine si la machine fonctionnait comme dynamo ordinaire mue mécaniquement en produisant le même courant continu 2I.

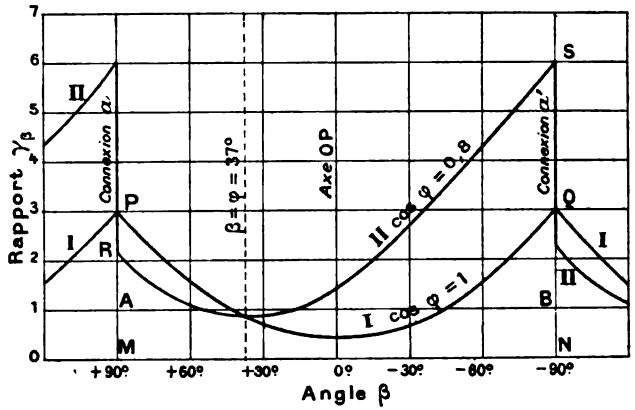
Le calcul précédent suppose, bien entendu, que tous les conducteurs de l'armature ont même section.

La courbe I de la figure 154 représente le rapport γ_β dans l'hypothèse de la coïncidence de phase du courant et de la tension primaires. On voit que le dégagement de chaleur n'est pas le même dans les divers conducteurs de l'armature.

Digitized by Google

La perte de puissance est minimum dans les spires situées à égale distance des points a, a' reliés aux bagues; elle est

Fig. 154.



maximum dans les spires adjacentes à ces points de connexion.

En portant successivement dans la relation (10) $\beta = 0$, $\beta = -\frac{\pi}{2}$, $\beta = +\frac{\pi}{2}$, on a

$$\beta = 0, \qquad \gamma_\beta = 3 - \frac{8}{\pi} = 3 - 2,5465 = 0,4535,$$

$$\beta = -\frac{\pi}{2}, \qquad \gamma_\beta = 3,$$

$$\beta = +\frac{\pi}{2}, \qquad \gamma_\beta = 3.$$

La perte de puissance dans les spires du convertisseur situées à égale distance des points a, a' de connexion avec les bagues est donc un peu inférieure à la moitié de la perte de puissance que produirait le courant I de la dynamo. Pour les spires adjacentes aux points de connexion a, a', la perte de puissance est trois fois plus grande dans le convertisseur que dans la dynamo.

L'une des quantités les plus importantes est la perte totale

Digitized by Google

de puissance W dans l'enroulement de l'armature. Cette perte est évidemment égale à deux fois la perte dans une moitié de l'armature. En désignant par R la résistance d'une moitié aPa' de l'enroulement de l'armature, la perte W a donc pour expression

$$(11)\quad \left\{\begin{aligned} W &= 2\int_{\beta=-\frac{\pi}{2}}^{\beta=+\frac{\pi}{2}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2\left(3 - \frac{8}{\pi}\cos\beta\right) \\ &= 2RI^2\,\frac{1}{\pi}\int_{\beta=-\frac{\pi}{2}}^{\beta=+\frac{\pi}{2}}\left(3 - \frac{8}{\pi}\cos\beta\right)d\beta \end{aligned}\right.$$

ou

$$(12)\qquad W = 2RI^2\left(3 - \frac{16}{\pi^2}\right) = 2RI^2 \times 1,38.$$

La puissance perdue dans l'enroulement de l'armature du convertisseur à courant alternatif est donc supérieure de 38 pour 100 à la perte $2RI^2$ qui aurait lieu si la machine fonctionnait comme dynamo mue mécaniquement, en fournissant le même courant continu $2I$.

Si l'on veut que la perte de puissance dans l'enroulement de l'armature soit la même dans les deux cas, on devra donc réduire le courant et, par suite, la puissance du convertisseur, dans un rapport K tel qu'on ait

$$2R(I^2K^2) \times 1,38 = 2RI^2,$$

d'où

$$(13)\qquad K = \frac{1}{\sqrt{1,38}} = \frac{1}{1,174} = 0,85.$$

Donc, *si le facteur de puissance est égal à l'unité, et la tension primaire sinusoïdale, la puissance d'un convertisseur à courant alternatif simple est égale à* 85 *pour* 100 *de celle de la machine fonctionnant comme dynamo ordinaire, ou comme moteur à courant continu.*

Cette règle suppose le rendement égal à l'unité et ne tient pas compte de l'inégale production de chaleur dans les divers conducteurs de l'armature, c'est-à-dire qu'elle admet que la température de ces conducteurs se trouve sensiblement éga-

Digitized by Google

lisée par le fait que l'enroulement est noyé dans un grand nombre de cannelures étroites du noyau de tôle.

Admettons maintenant que le courant primaire présente un retard de phase φ par rapport à la tension aux bagues. Le courant alternatif dans la moitié aPa' de l'armature à l'instant t est alors, le sens du courant continu étant pris comme sens positif,

$$-\frac{J\sqrt{2}}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)=-\frac{2I}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)$$

et le courant résultant dans la bobine Q

$$(14)\qquad i'=I\left[1-\frac{2}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)\right].$$

La perte de puissance dans la bobine Q, à l'instant t, est donc

$$ri'^2=rI^2\left[1-\frac{2}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)\right]^2.$$

Cette expression est applicable pour toutes les positions de la bobine Q à droite de la ligne AB, c'est-à-dire pour toutes les valeurs de l'angle α comprises entre β et $\pi+\beta$. La perte moyenne de puissance dans cette bobine a donc pour expression :

$$(15)\quad\left\{\begin{aligned}
\zeta&=2n\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} rI^2\left[1-\frac{2}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)\right]^2 dt\\
&=2nrI^2\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}\left[1-\frac{2}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)\right]^2\frac{d\alpha}{2\pi n},\\
&=rI^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}(1-2\sin\alpha+2\tang\varphi\cos\alpha)^2 d\alpha,\\
&=rI^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}[1-4\sin\alpha+4\sin^2\alpha+4\tang\varphi\cos\alpha\\
&\qquad\qquad-8\tang\varphi\sin\alpha\cos\alpha+4\tang^2\varphi\cos^2\alpha]\,d\alpha,\\
&=rI^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}[3-4\sin\alpha-2\cos2\alpha+4\tang\varphi\cos\alpha\\
&\qquad\qquad-4\tang\varphi\sin2\alpha+2\tang^2\varphi+2\tang^2\varphi\cos2\alpha]\,d\alpha,
\end{aligned}\right.$$

Digitized by Google

et enfin

$$(16)\quad \zeta = rI^2\left(3 - \frac{8}{\pi}\cos\beta - \frac{8}{\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + 2\operatorname{tang}^2\varphi\right).$$

Le rapport γ_β des pertes de puissance dans la bobine Q, pour le convertisseur et pour la dynamo, est donc

$$(17)\qquad \gamma_\beta = 3 - \frac{8}{\pi}\cos\beta - \frac{8}{\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + 2\operatorname{tang}^2\varphi.$$

Cette relation n'est applicable qu'entre les limites $\beta = -\frac{\pi}{2}$ et $\beta = +\frac{\pi}{2}$. Elle montre que, lorsque le courant et la tension primaires ne coïncident pas en phase, le développement de chaleur dans les diverses spires de l'armature n'est plus symétrique par rapport à l'axe OP, ou par rapport aux connexions a, a' avec les bagues.

Le rapport γ_β est minimum pour

$$\frac{8}{\pi}\sin\beta - \frac{8}{\pi}\operatorname{tang}\varphi\cos\beta = 0$$

ou

$$(18)\qquad \operatorname{tang}\beta = \operatorname{tang}\varphi.$$

Les spires donnant lieu à la perte minimum de puissance sont donc celles situées à une distance angulaire du milieu de la section aPa' précisément égale à l'angle φ de retard de phase, et entre a et P. La relation (17) représentant un arc de sinusoïde, les spires dans lesquelles le développement de chaleur est maximum sont celles adjacentes au point de connexion a', et situées juste avant cette connexion, si l'on se déplace dans le sens du mouvement de l'armature; cette position correspond à $\beta = -\frac{\pi}{2}$.

Exemple. — Admettons un facteur de puissance égal à 0,8; on a alors

$$\cos\varphi = 0,8$$
$$\sin\varphi = 0,6$$
$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{3}{4}$$
$$\varphi = 37^\circ,$$

Digitized by Google

et par suite

$$\gamma_\beta = 3 - 2,5465 \cos\beta - 2,5465 \frac{3}{4} \sin\beta + 2 \frac{9}{16}$$
$$= 4,125 - 2,5465 \cos\beta - 1,991 \sin\beta.$$

La courbe II de la figure 154 représente le rapport γ_β pour le facteur de puissance $\cos\varphi = 0,8$. Ce rapport a pour les angles $\beta = \varphi$, $\beta = -\frac{\pi}{2}$, $\beta = +\frac{\pi}{2}$ les valeurs suivantes :

$$\beta = \varphi, \qquad \gamma_\beta = 3 - 2,5465.0,8 - 2,5465 \frac{3}{4} 0,6 + 2 \frac{9}{16} = 0,943,$$

$$\beta = -\frac{\pi}{2}, \quad \gamma_\beta = 3 + 2,5465 \frac{3}{4} + 2 \frac{9}{16} = 6,035,$$

$$\beta = +\frac{\pi}{2}, \quad \gamma_\beta = 3 - 2,5465 \frac{3}{4} + 2 \frac{9}{16} = 2,215.$$

Pour un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,8$, la perte minimum de puissance, qui a lieu dans la spire située à une distance angulaire $\varphi = 37°$ du point P, et entre a et P, est donc un peu inférieure, dans le convertisseur à courant alternatif, à celle qui se produirait dans le cas de la dynamo pour une même valeur du courant continu. La perte de puissance dans les spires situées juste avant un point de connexion est plus de six fois plus grande pour le convertisseur que pour la dynamo. Enfin, la perte dans les spires situées juste après les points de connexion est un peu plus de deux fois plus grande dans le convertisseur que dans la dynamo.

Remarque. — Si le courant avait une avance de phase φ sur la tension, l'angle φ devrait être affecté du signe — dans les formules précédentes, et être porté à droite de l'axe OP dans la figure 154. La perte minimum de puissance aurait lieu dans la spire située à une distance angulaire φ du milieu P de la section aPa', et entre P et a'. La perte maximum se produirait dans les spires situées juste après les points de connexion. L'arc de sinusoïde RS de la figure 154 serait déplacé d'un angle 2φ vers la droite.

Dans le cas général d'une différence de phase φ entre le

Digitized by Google

courant primaire et la tension, la puissance totale perdue dans l'enroulement de l'armature est, en désignant toujours par R la résistance d'une moitié de cet enroulement,

$$(18)\quad W = 2\int_{\beta=-\frac{\pi}{2}}^{\beta=+\frac{\pi}{2}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2\left(3 - \frac{8}{\pi}\cos\beta - \frac{8}{\pi}\tang\varphi\sin\beta + 2\tang^2\varphi\right)$$

ou

$$(19)\qquad W = 2RI^2\left(3 - \frac{16}{\pi^2} + 2\tang^2\varphi\right).$$

La quantité $2RI^2$ représente la perte de puissance que produirait le courant continu $2I$ aux balais de la machine fonctionnant comme dynamo ordinaire. La perte de puissance W dans l'enroulement de l'armature du convertisseur est indépendante du signe de l'angle φ; elle est égale pour un même angle de retard ou d'avance de phase.

Exemple. — Soit un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,8$, correspondant à

$$\varphi = 37^\circ,$$

$$\tang\varphi = \frac{3}{4}.$$

On a alors

$$3 - \frac{16}{\pi^2} + 2\tang^2\varphi = 3 - 1,621 + 1,125 = 2,504.$$

Si l'on veut que la perte de puissance dans l'enroulement de l'armature soit la même pour le convertisseur à courant alternatif que pour la dynamo, le courant du convertisseur et, par suite, sa puissance devront être réduits dans un rapport K tel qu'on ait

$$2R(I^2K^2) \times 2,504 = 2RI^2,$$

d'où

$$K = \frac{1}{\sqrt{2,504}} = \frac{1}{1,581} = 0,632.$$

La puissance du convertisseur sera donc seulement 63 pour 100 de celle de la machine fonctionnant comme dynamo

Digitized by Google

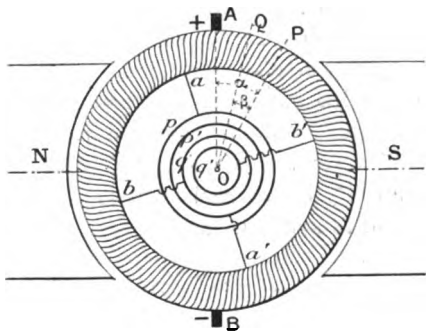
mue mécaniquement. Ce facteur ne tient encore pas compte de l'inégal développement de chaleur dans les divers conducteurs de l'armature.

Remarque. — Les rapports des aires MPQN et MRSN à l'aire MABN représentent les rapports des pertes de puissance dans l'enroulement de l'armature du convertisseur, pour $\cos\varphi = 1$ et pour $\cos\varphi = 0,8$, à la perte de puissance dans le même enroulement de la machine fonctionnant comme dynamo ordinaire, le courant continu aux balais A, B étant le même dans les trois cas.

III. — *Convertisseur à courant diphasé.*

Relions encore deux points b, b', à 90° des points a, a', à une seconde paire de bagues métalliques (*fig.* 155) que nous

Fig. 155.



connecterons à la seconde section d'une canalisation à courant diphasé.

E_c étant la tension entre les balais A, B, la moyenne efficace E_1 des tensions entre les points a, a' et b, b' est comme dans le cas précédent

$$(1) \qquad E_1 = \frac{E_c}{\sqrt{2}} = 0,707 E_c.$$

Admettons d'abord que le courant primaire coïncide en

Digitized by Google

phase avec la tension, et soit 2J le courant efficace à chaque paire de bagues correspondant à une puissance P absorbée par la machine fonctionnant comme moteur synchrone.

Le courant dans un quadrant ab' est la résultante de deux courants de moyenne efficace J et différant en phase d'un quart de période. La moyenne efficace de ce courant est donc $J\sqrt{2}$, et sa valeur maximum 2J. Nous avons vu (p. 321) que la tension efficace entre les points a et b' est $E' = 0,5\,E_c$.

On voit aisément que la force électromotrice ainsi que le courant dans la section ab', considérés comme positifs de a en b', sont proportionnels au sinus de l'angle α que fait l'axe OP de cette section avec la ligne neutre AB suivant laquelle sont calés les balais A, B, et qui, dans un convertisseur à courant diphasé, est, ainsi que nous le verrons plus loin, sensiblement perpendiculaire à la ligne NS des pôles. Le courant dans ab' est donc nul quand OP est suivant OA; il croît en même temps que α, devient maximum positif et égal à 2J lorsque OP coïncide avec OS, puis décroît, s'annule quand P traverse OB, devient négatif et maximum lorsque P vient en regard de N, décroît en valeur absolue, et s'annule à l'instant où OP passe de nouveau par sa position initiale OA.

Si nous fermons les balais A, B sur un circuit, nous recueillerons un courant continu 2I. Le courant résultant dans une bobine Q de la section ab', située à une distance angulaire β du milieu P, et de résistance r, est, en adoptant comme sens positif le sens du courant continu,

$$i = I - 2J \sin\alpha. \tag{2}$$

En admettant que le rendement du convertisseur est égal à l'unité, nous devrons avoir

$$P = 2.2J.E_1 = 2I.E_c, \tag{3}$$

et, par suite,

$$J = \frac{I}{\sqrt{2}}. \tag{4}$$

Le courant résultant dans la bobine Q, à l'instant t, a donc

Digitized by Google

pour expression

$$(5) \qquad i = \mathrm{I} - \mathrm{I}\sqrt{2}\sin\alpha = \mathrm{I}(1 - \sqrt{2}\sin\alpha),$$

et la perte de puissance à l'instant t dans cette bobine est

$$(6) \qquad ri^2 = r\mathrm{I}^2(1 - \sqrt{2}\sin\alpha)^2.$$

Cette expression est applicable pour toutes les positions de la bobine Q du quadrant ab' sur la demi-circonférence ASB, c'est-à-dire pour toutes les valeurs de l'angle α comprises entre β et $\pi + \beta$.

La perte moyenne de puissance dans la bobine Q est donc

$$(7) \qquad \left\{ \begin{aligned} \zeta &= 2n\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} r\mathrm{I}^2(1 - \sqrt{2}\sin\alpha)^2 dt \\ &= 2nr\mathrm{I}^2\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}(1 - 2\sqrt{2}\sin\alpha + 2\sin^2\alpha)\frac{d\alpha}{2\pi n}, \end{aligned} \right.$$

$$(8) \qquad \zeta = r\mathrm{I}^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}(1 - 2\sqrt{2}\sin\alpha + 2\sin^2\alpha)\,d\alpha,$$

$$(9) \qquad \zeta = r\mathrm{I}^2\left(2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta\right).$$

Si la machine fonctionnait comme dynamo mue mécaniquement en produisant le même courant continu $2\mathrm{I}$, la perte de puissance dans la bobine Q serait $r\mathrm{I}^2$; le rapport des pertes de puissance dans cette bobine, pour le convertisseur et pour la dynamo, est donc

$$(10) \qquad \gamma_\beta = 2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta = 2 - 1{,}800\cos\beta,$$

relation applicable au quadrant ab', c'est-à-dire pour les valeurs de β comprises entre $-\frac{\pi}{4}$ et $+\frac{\pi}{4}$. C'est l'équation d'un arc de sinusoïde (courbe I de la figure 156).

Ce rapport est minimum pour $\beta = 0$ et égal à

$$\gamma_0 = 2 - 1{,}800 = 0{,}200,$$

Digitized by Google

γ_β est maximum pour $\beta = -\frac{\pi}{4}$ et $\beta = +\frac{\pi}{4}$,

$$\gamma_{-\frac{\pi}{4}} = \gamma_{+\frac{\pi}{4}} = 2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2} = 2 - \frac{4}{\pi} = 0,727.$$

Le rapport γ_β varie donc entre 0,20 et 0,73. Le développement de chaleur n'est pas réparti uniformément dans les spires de l'armature du convertisseur. La perte de puissance dans les spires du convertisseur situées à égale distance des points a, b' de connexion avec les bagues est égale au cinquième de la perte de puissance que produirait le courant I de la dynamo. La perte de puissance dans les spires adjacentes aux points de connexion avec les bagues est un peu inférieure aux trois quarts de celle qui aurait lieu dans la dynamo.

La perte totale de puissance W dans l'enroulement de l'armature est évidemment égale à quatre fois la perte de puissance dans une section ab'; on a donc, en désignant par R la résistance d'une moitié de l'enroulement de l'armature,

$$(11)\quad \left\{\begin{aligned} W &= 4\int_{\beta=-\frac{\pi}{4}}^{\beta=+\frac{\pi}{4}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2\left(2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta\right) \\ &= 2RI^2\frac{2}{\pi}\int_{\beta=-\frac{\pi}{4}}^{\beta=+\frac{\pi}{4}}\left(2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta\right)d\beta, \end{aligned}\right.$$

$$(12)\quad W = 2RI^2\left(2 - \frac{16}{\pi^2}\right) = 2RI^2 \times 0,38.$$

La perte de puissance dans l'enroulement de l'armature d'un convertisseur à courant diphasé est donc égale à 38 pour 100 de celle qui se produirait dans cette machine fournissant la même puissance comme dynamo mue mécaniquement.

Si nous admettons la même perte de puissance dans l'enroulement de l'armature dans les deux cas, nous pourrons accroître la puissance du convertisseur dans un rapport K tel qu'on ait

$$(13)\quad 2R(I^2K^2) \times 0,38 = 2RI^2,$$

Digitized by Google

d'où

$$(14) \qquad K = \frac{1}{\sqrt{0,38}} = \frac{1}{0,616} = 1,62.$$

Donc, *si le facteur de puissance est égal à l'unité, et la tension primaire sinusoïdale, la puissance d'un convertisseur à courant diphasé est supérieure de* 62 *pour* 100 *à celle de la machine fonctionnant comme dynamo ordinaire.*

Cette règle suppose le rendement égal à l'unité, et ne tient pas compte de l'inégale production de chaleur dans les divers conducteurs de l'armature.

Admettons maintenant que le courant primaire a un retard de phase φ par rapport à la tension aux bagues. Pour la même puissance que précédemment, le courant primaire maximum dans un conducteur de l'armature devient

$$\frac{2J}{\cos\varphi} = \frac{I\sqrt{2}}{\cos\varphi}$$

et le courant résultant dans la bobine Q, à l'instant t, est

$$(15) \quad i' = I - \frac{I\sqrt{2}}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi) = I\left[1 - \frac{\sqrt{2}}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)\right].$$

La perte de puissance dans la bobine Q, à l'instant t, a donc pour expression

$$(16) \quad \left\{\begin{aligned} ri'^2 &= rI^2\left[1 - \frac{\sqrt{2}}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi)\right]^2 \\ &= rI^2(1 - \sqrt{2}\sin\alpha + \sqrt{2}\tang\varphi\cos\alpha)^2. \end{aligned}\right.$$

La perte moyenne de puissance dans la bobine Q est donc

$$(17) \quad \zeta = 2n\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} rI^2(1 - \sqrt{2}\sin\alpha + \sqrt{2}\tang\varphi\cos\alpha)^2\,\frac{d\alpha}{2\pi n},$$

$$(18) \quad \left\{\begin{aligned} \zeta = rI^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}\Big[&1 - 2\sqrt{2}\sin\alpha + 2\sin^2\alpha + 2\sqrt{2}\tang\varphi\cos\alpha \\ &- 4\tang\varphi\sin\alpha\cos\alpha + 2\tang^2\varphi\cos^2\alpha\Big]d\alpha, \end{aligned}\right.$$

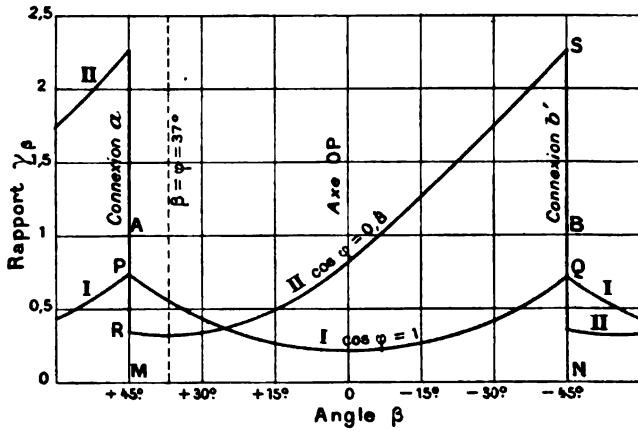
$$(19) \quad \zeta = rI^2\left(2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\tang\varphi\sin\beta + \tang^2\varphi\right).$$

Digitized by Google

Le rapport de la perte de puissance dans la bobine Q, dans le convertisseur, pour un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,8$, et dans la dynamo, pour la même puissance, est donc

$$(20)\quad \left\{\begin{aligned} \gamma_\beta &= 2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \operatorname{tang}^2\varphi \\ &= 2 - 1,800\cos\beta - 1,800\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \operatorname{tang}^2\varphi, \end{aligned}\right.$$

Fig. 156.



relation qui représente un arc de sinusoïde RS (courbe II de la figure 156).

Ce rapport est minimum pour

$$\frac{4\sqrt{2}}{\pi}\sin\beta - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\operatorname{tang}\varphi\cos\beta = 0,$$

ou

$$\operatorname{tang}\beta = \operatorname{tang}\varphi.$$

Les spires dans lesquelles le développement de chaleur est minimum sont donc celles qui se trouvent à une distance angulaire de OP égale à l'angle φ de retard de phase du courant, et entre les points a et P. Si φ est égal ou supérieur à $\frac{\pi}{4}$, la perte minimum de puissance se produit dans la spire

Digitized by Google

adjacente à la connexion a, et entre a et P, pour laquelle on a $\beta = +\frac{\pi}{4}$.

La relation (20) n'est applicable que pour les valeurs de l'angle β comprises entre $-\frac{\pi}{4}$ et $+\frac{\pi}{4}$. La perte maximum de puissance a donc lieu dans la spire située juste avant la connexion b', en se déplaçant dans le sens du mouvement de l'armature, c'est-à-dire pour $\beta = -\frac{\pi}{4}$. Le développement de chaleur dans les divers conducteurs n'est donc plus symétrique par rapport au milieu P d'une section ou par rapport aux points de connexion avec les bagues.

Remarque. — Si le courant présentait une avance de phase φ sur la tension, la sinusoïde se trouverait déplacée d'un angle 2φ vers la droite, dans la figure 156. C'est alors la spire située juste après la connexion a qui chaufferait le plus.

Exemple. — Admettons un facteur de puissance égal à 0,8; on a donc

$$\cos\varphi = 0,8,$$
$$\sin\varphi = 0,6,$$
$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{3}{4},$$
$$\varphi = 37^\circ,$$

et, par suite,

$$\gamma_\varphi = 2 - 1,800 \times 0,8 - 1,800 \times \frac{3}{4} \times 0,6 + \frac{9}{16} = 0,3125,$$
$$\gamma_0 = 2 - 1,800 + 0,5625 = 0,7625,$$
$$\gamma_{+\frac{\pi}{4}} = 2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\frac{3}{4}\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{9}{16} = 0,3343,$$
$$\gamma_{-\frac{\pi}{4}} = 2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\frac{3}{4}\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{9}{16} = 2,2448.$$

La puissance totale perdue dans l'enroulement de l'armature, dans le cas d'un retard de phase φ du courant par rap-

Digitized by Google

port à la tension est

$$(21)\quad W = 4\int_{\beta=-\frac{\pi}{4}}^{\beta=+\frac{\pi}{4}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2\left(2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \operatorname{tang}^2\varphi\right),$$

$$(22)\quad W = 2RI^2\,\frac{2}{\pi}\int_{\beta=-\frac{\pi}{4}}^{\beta=+\frac{\pi}{4}} \left(2 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\cos\beta - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \operatorname{tang}^2\varphi\right) d\beta,$$

$$(23)\qquad W = 2RI^2\left(2 - \frac{16}{\pi^2} + \operatorname{tang}^2\varphi\right),$$

$2RI^2$ représente la perte de puissance que produirait le courant continu $2I$ aux balais A, B dans l'enroulement de l'armature de la machine fonctionnant comme dynamo ordinaire.

Le facteur $2 - \frac{16}{\pi^2} + \operatorname{tang}^2\varphi$ est indépendant du signe de l'angle φ; il est égal pour un même angle de retard ou d'avance de phase.

Exemple. — Soit un facteur de puissance égal à 0,8; on a alors

$$2 - \frac{16}{\pi^2} + \operatorname{tang}^2\varphi = 2 - 1,621 + \frac{9}{16} = 0,9415.$$

Pour une perte en watts donnée dans l'enroulement de l'armature, et pour un facteur de puissance égal à 0,8, la puissance du convertisseur à courant diphasé est à la puissance de la dynamo dans un rapport K tel qu'on ait

$$2R(I^2K^2) \times 0,9415 = 2RI^2,$$

d'où

$$K = \frac{1}{\sqrt{0,9415}} = \frac{1}{0,97} = 1,03.$$

IV. — *Convertisseur à courant triphasé.*

Relions trois points *a*, *b*, *c* de l'enroulement de l'armature, distants de 120°, à trois bagues métalliques *p*, *q*, *s*, rece-

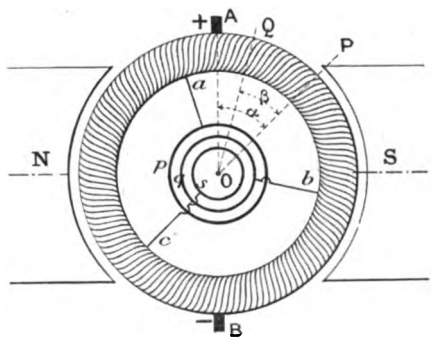
Digitized by Google

vant le courant triphasé (*fig.* 157). La tension efficace E′ entre deux bagues est, en désignant par E_c la tension aux balais A, B,

$$(1) \qquad E' = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{3} = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,612 E_c.$$

La tension entre deux bagues p, q est proportionnelle au sinus de l'angle α que fait l'axe OP de la section ab avec la ligne neutre AB, suivant laquelle se trouvent calés les balais, et qui, dans un convertisseur à courant triphasé, est, ainsi

Fig. 157.



que nous le verrons plus loin, sensiblement perpendiculaire à la ligne NS des pôles.

Admettons tout d'abord que le courant et la tension primaires coïncident en phase, et soit J le courant efficace dans chaque section de l'enroulement lorsque la machine fonctionne comme moteur en absorbant une puissance P. Le courant à une bague est évidemment $J\sqrt{3}$.

Puisque, par hypothèse, le courant coïncide en phase avec la tension, le courant dans une section ab est à chaque instant proportionnel au sinus de l'angle α que fait l'axe OP avec la ligne OA.

Si nous fermons les balais A, B sur un circuit, nous obtiendrons un courant continu 2I. Le courant résultant dans une bobine Q de la section ab, située à une distance

Digitized by Google

angulaire β du milieu P de cette section, a pour expression

$$(2) \qquad i = I - J\sqrt{2}\sin\alpha.$$

Si nous négligeons les pertes dans le convertisseur, pertes du reste très faibles, nous devrons avoir

$$(3) \qquad 3JE' = 3J\frac{E_c\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 2IE_c,$$

d'où

$$(4) \qquad J = \frac{4\sqrt{2}}{3\sqrt{3}}I.$$

Le courant résultant dans la bobine Q, à l'instant t, est donc, en prenant comme sens positif le sens du courant continu,

$$(5) \qquad i = I - \frac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha = I\left(1 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha\right).$$

La perte de puissance dans cette bobine, à l'instant t, a pour expression

$$(6) \qquad ri^2 = rI^2\left(1 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha\right)^2,$$

relation qui s'applique pour toutes les positions de la bobine Q sur la demi-circonférence ASB, c'est-à-dire pour toutes les valeurs de α comprises entre β et $\pi + \beta$.

La perte moyenne de puissance dans cette bobine est donc

$$(7) \qquad \left\{\begin{aligned} \zeta &= 2n\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} rI^2\left(1 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha\right)^2 dt \\ &= rI^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}\left(1 - \frac{16}{3\sqrt{3}}\sin\alpha + \frac{64}{27}\sin^2\alpha\right)d\alpha, \end{aligned}\right.$$

$$(8) \quad \zeta = rI^2\left(\frac{59}{27} - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\cos\beta\right) = rI^2(2,185 - 1,960\cos\beta).$$

Le facteur

$$(9) \qquad \gamma_\beta = 2,185 - 1,960\cos\beta$$

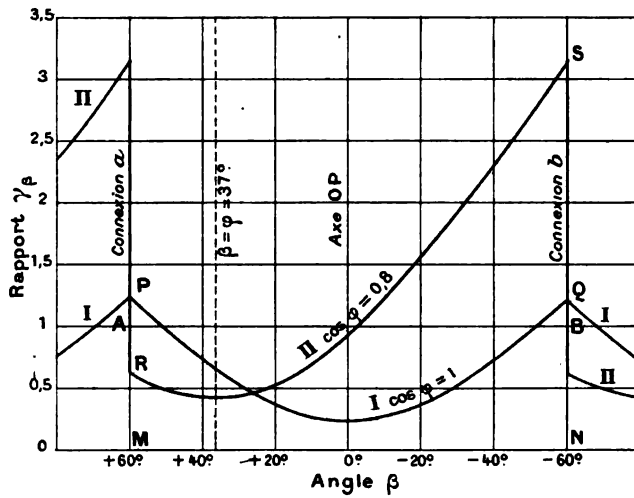
est donc le rapport des pertes de puissance dans la bobine Q,

Digitized by Google

dans le convertisseur à courant triphasé et dans la dynamo, pour un même courant continu 2I aux balais A, B.

La relation (9), qui est valable pour les valeurs de β comprises entre $-\frac{\pi}{3}$ et $+\frac{\pi}{3}$, représente un arc de sinu-

Fig. 158.



soïde PQ (*fig.* 158). Le rapport γ_β est minimum pour $\beta = 0$ et égal à

$$\gamma_0 = 2,185 - 1,960 = 0,225.$$

La perte minimum de puissance a donc lieu dans les spires situées à égale distance des points de connexion avec les bagues. La perte de puissance dans ces spires est un peu inférieure au quart de celle qu'y produirait le courant continu I dans la dynamo.

Le rapport γ_β est maximum pour $\beta = -\frac{\pi}{3}$ et $\beta = +\frac{\pi}{3}$, et égal à

$$\gamma_{-\frac{\pi}{3}} = \gamma_{+\frac{\pi}{3}} = 2,185 - 1,960\,\frac{1}{2} = 1,205.$$

La perte de puissance dans les spires adjacentes aux points

Digitized by Google

de connexion de l'enroulement de l'armature avec les bagues est donc maximum et supérieure d'environ 20 pour 100 à celle qu'y produirait le courant continu I.

La perte totale de puissance W dans l'enroulement de l'armature est évidemment égale à trois fois la perte de puissance dans une section; on a donc, en désignant par R la résistance d'une moitié de l'enroulement de l'armature,

$$(10)\quad \begin{cases} W = 3\displaystyle\int_{\beta=-\frac{\pi}{3}}^{\beta=+\frac{\pi}{3}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2 \left(2,185 - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\cos\beta\right) \\ \quad = 3\,RI^2\,\dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_{\beta=-\frac{\pi}{3}}^{\beta=+\frac{\pi}{3}} \left(2,185 - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\cos\beta\right) d\beta, \end{cases}$$

$$(11)\quad \begin{cases} W = 3\,RI^2\,\dfrac{1}{\pi}\left[2,185\,\dfrac{2\pi}{3} - \dfrac{32}{3\sqrt{3}\pi}\left(\dfrac{\sqrt{3}}{2} + \dfrac{\sqrt{3}}{2}\right)\right] \\ \quad = 2\,RI^2\left(2,185 - \dfrac{16}{\pi^2}\right), \end{cases}$$

$$(12)\qquad W = 2\,RI^2 \times 0,564.$$

La perte de puissance dans l'enroulement de l'armature du convertisseur à courant triphasé, pour un facteur de puissance égal à l'unité, est égale à environ 57 pour 100 de la perte de puissance $2RI^2$ qui aurait lieu si la machine, fonctionnant comme dynamo mue mécaniquement, fournissait le même courant continu 2I.

Si l'on veut que la perte en watts dans l'enroulement de l'armature soit la même dans les deux cas, on devra accroître la puissance du convertisseur dans un rapport K tel que l'on ait

$$2R(I^2K^2) \times 0,564 = 2RI^2,$$

d'où

$$(13)\qquad K = \frac{1}{\sqrt{0,564}} = \frac{1}{0,75} = 1,33.$$

Donc, *si le facteur de puissance est égal à l'unité, et la tension primaire sinusoïdale, la puissance d'un convertisseur*

Digitized by Google

à courant triphasé est supérieure de 33 *pour* 100 *à celle de la machine fonctionnant comme dynamo ordinaire.*

Cette règle suppose le rendement égal à l'unité, et ne tient pas compte de l'inégale production de chaleur dans les divers conducteurs de l'armature.

Admettons maintenant que le courant primaire a un retard de phase φ par rapport à la tension. Pour la même puissance que précédemment, le courant résultant dans la bobine Q est

$$(14)\quad \begin{cases} i' = \mathrm{I} - \dfrac{8}{3\sqrt{3}}\,\mathrm{I}\,\dfrac{1}{\cos\varphi}\sin(\alpha-\varphi) \\ \quad = \mathrm{I}\left(1 - \dfrac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha + \dfrac{8}{3\sqrt{3}}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right) \end{cases}$$

et la perte de puissance dans cette bobine à l'instant t

$$ri'^2 = r\mathrm{I}^2\left(1 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha + \frac{8}{3\sqrt{3}}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right)^2.$$

La perte moyenne de puissance dans la bobine Q est donc

$$(15)\quad \zeta = 2n\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} r\mathrm{I}^2\left(1 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha + \frac{8}{3\sqrt{3}}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right)^2\frac{d\alpha}{2\pi n},$$

$$(16)\quad \zeta = r\mathrm{I}^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}\left(1 - \frac{8}{3\sqrt{3}}\sin\alpha + \frac{8}{3\sqrt{3}}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right)^2 d\alpha,$$

$$(17)\quad \zeta = r\mathrm{I}^2\left(2,185 - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\cos\beta - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \frac{32}{27}\operatorname{tang}^2\varphi\right).$$

Le facteur

$$(18)\quad \gamma_\beta = 2,185 - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\cos\beta - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \frac{32}{27}\operatorname{tang}^2\varphi$$

est minimum pour

$$\frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\sin\beta - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\operatorname{tang}\varphi\cos\beta = 0$$

ou

$$\operatorname{tang}\beta = \operatorname{tang}\varphi.$$

Digitized by Google

La perte minimum de puissance a donc lieu dans les spires situées à une distance angulaire du milieu P de la section *ab* égale à l'angle φ de retard de phase, et entre *a* et P.

La relation (17) n'étant applicable qu'entre les limites

$$= \beta - \frac{\pi}{3} \quad \text{et} \quad \beta = + \frac{\pi}{3},$$

le rapport γ_β est maximum pour $\beta = -\frac{\pi}{3}$.

Exemple. — Soit un facteur de puissance égal à 0,8; on a

$$\cos\varphi = 0,8,$$
$$\sin\varphi = 0,6,$$
$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{3}{4},$$
$$\varphi = 37^\circ.$$

On en déduit les valeurs particulières de γ_β suivantes,

$$\beta = \varphi, \qquad \gamma_\beta = 0,402,$$
$$\beta = 0, \qquad \gamma_\beta = 0,892,$$
$$\beta = +\frac{\pi}{3}, \qquad \gamma_\beta = 0,599,$$
$$\beta = -\frac{\pi}{3}, \qquad \gamma_\beta = 3,145.$$

La perte maximum a lieu dans les spires adjacentes au point *b* de connexion de l'enroulement avec la bague et situées juste avant ce point si l'on se déplace dans le sens du mouvement de l'armature (courbe RS de la figure 158).

Remarque. — Si la phase du courant primaire était en avance sur la tension, l'angle φ serait affecté du signe — et serait porté à droite de OP dans la figure 158. La perte maximum de puissance aurait lieu dans les spires situées juste après le point de connexion *a*.

La perte totale de puissance dans l'enroulement de l'arma-

Digitized by Google

ture est

$$(19)\quad \left\{ W = 3\int_{\beta=-\frac{\pi}{3}}^{\beta=+\frac{\pi}{3}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2 \left[2,185 - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\cos\beta - \frac{32}{3\sqrt{3}\pi}\operatorname{tang}\varphi \sin\beta + \frac{32}{27}\operatorname{tang}^2\varphi \right], \right.$$

$$(20)\qquad W = 2RI^2\left(2,185 - \frac{16}{\pi^2} + \frac{32}{27}\operatorname{tang}^2\varphi\right).$$

Exemple. — Soit un facteur de puissance égal à 0,8; on a

$$\cos\varphi = 0,8,$$
$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{3}{4}$$

et, par suite,

$$2,185 - \frac{16}{\pi^2} + \frac{32}{27}\operatorname{tang}^2\varphi = 2,185 - 1,621 + \frac{32}{27}\,\frac{9}{16} = 1,231.$$

Pour une même perte en watts dans l'enroulement de l'armature, et pour un facteur de puissance égal à 0,8, la puissance du convertisseur à courant triphasé est à la puissance de la dynamo dans un rapport K tel qu'on ait

$$2R(I^2K^2) \times 1,231 = 2RI^2,$$

d'où

$$K = \frac{1}{\sqrt{1,231}} = \frac{1}{1,109} = 0,90.$$

La puissance du convertisseur à courant triphasé est donc dans ce cas égale à 90 pour 100 de la puissance de la machine utilisée comme dynamo mue mécaniquement.

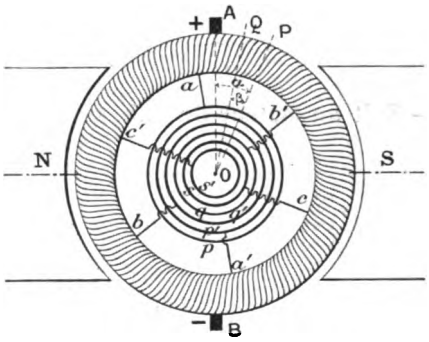
V. — *Convertisseur à courant hexaphasé.*

Relions six points de l'enroulement de l'armature, situés à des intervalles d'un sixième de circonférence, à six bagues

Digitized by Google

métalliques. Ces points a, c', b, a', c, b' (*fig.* 159) prendront successivement un potentiel maximum $\frac{E_c}{2}$, au-dessus ou au-dessous du potentiel moyen, E_c étant la tension entre les balais A, B calés suivant la ligne neutre. Les potentiels de

Fig. 159.



ces points a, c', b, a', c, b' diffèrent évidemment deux à deux en phase d'un sixième de période.

Considérons maintenant un transformateur à courant triphasé dont les trois bobines secondaires n'ont entre elles aucune connexion, et fournissent entre leurs deux bornes une tension efficace $\frac{E_c}{\sqrt{2}}$. L'une quelconque de ces bobines produit entre son milieu et ses deux bornes deux potentiels différant en phase d'une demi-période, et dont la valeur maximum au-dessus ou au-dessous du potentiel moyen est égale à $\frac{E_c}{2}$. On obtient de la sorte, aux six bornes secondaires de ce transformateur, six potentiels ayant comme maximum $\frac{E_c}{2}$ et différant deux à deux en phase d'un sixième de période. Ces six bornes pourront être reliées respectivement aux six bagues connectées aux points a, c', b, a', c, b' de l'enroulement de l'armature du convertisseur. Les bornes d'une bobine secondaire du transformateur à courant triphasé seront reliées

Digitized by Google

aux points a, a' diamétralement opposés, les bornes de la bobine secondaire suivante aux points b et b', et enfin celles de la troisième bobine secondaire aux points c et c'.

Le transformateur ainsi monté permet de la sorte d'obtenir six tensions alternatives de même moyenne efficace et différant deux à deux en phase d'un sixième de période, à l'aide d'un courant primaire triphasé.

Nous avons vu que la tension efficace entre deux points de connexion consécutifs a, b' de l'enroulement de l'armature est

$$E' = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \sin\frac{\pi}{6} = \frac{E_c}{2\sqrt{2}}. \tag{1}$$

Admettons tout d'abord que le courant et la tension primaires coïncident en phase.

De l'examen des conditions de fonctionnement de la machine comme moteur synchrone, on tire aisément les conclusions suivantes :

1° Le courant à une bague est la résultante de deux courants égaux différant en phase d'un sixième de période. Le courant efficace à une bague est donc égal au courant efficace dans une section quelconque de l'enroulement de l'armature.

2° A un instant t quelconque, la tension aux bornes a, b' d'une section, ainsi que le courant circulant dans cette section, sont proportionnels au sinus de l'angle α que fait l'axe OP de cette section avec la ligne OA.

Soit J le courant efficace à une bague de la machine absorbant la puissance P, égal au courant à une borne secondaire du transformateur. En appelant 2I le courant continu recueilli aux balais A, B, le courant résultant dans une bobine Q de la section a, b' située à une distance angulaire β de l'axe OP, et à droite de AB, est

$$i = I - J\sqrt{2}\sin\alpha. \tag{2}$$

En supposant le rendement du convertisseur égal à l'unité, on doit avoir

$$3\left(J\frac{E_c}{\sqrt{2}}\right) = 2IE_c, \tag{3}$$

Digitized by Google

d'où

$$(4) \qquad J = \frac{2\sqrt{2}}{3} I = 0,943 I.$$

Le courant résultant dans la bobine Q, à l'instant t, est donc

$$(5) \qquad i = I\left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha\right).$$

La perte de puissance à l'instant t dans cette bobine, de résistance r, a donc pour expression

$$(6) \qquad ri^2 = rI^2\left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha\right)^2.$$

Cette expression est valable pour toutes les positions de la bobine Q sur la demi-circonférence ASB, c'est-à-dire pour tous les angles α compris entre β et $\pi + \beta$.

La perte moyenne de puissance dans la bobine Q est donc

$$(7) \qquad \left\{\begin{aligned} \zeta &= 2n\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} rI^2\left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha\right)^2 \frac{d\alpha}{2\pi n} \\ &= rI^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}\left(1 - \frac{8}{3}\sin\alpha + \frac{16}{9}\sin^2\alpha\right)d\alpha, \end{aligned}\right.$$

$$(8) \qquad \zeta = rI^2\left(\frac{17}{9} - \frac{16}{3\pi}\cos\beta\right).$$

Le facteur

$$(9) \qquad \gamma_\beta = \frac{17}{9} - \frac{16}{3\pi}\cos\beta = 1,889 - 1,698\cos\beta$$

est le rapport des pertes de puissance dans une bobine de l'armature du convertisseur et de la dynamo pour un même courant continu $2I$ aux balais A, B.

Ce rapport γ_β est minimum pour $\beta = 0$ et maximum pour $\beta = -\frac{\pi}{6}$ et $\beta = +\frac{\pi}{6}$. On a

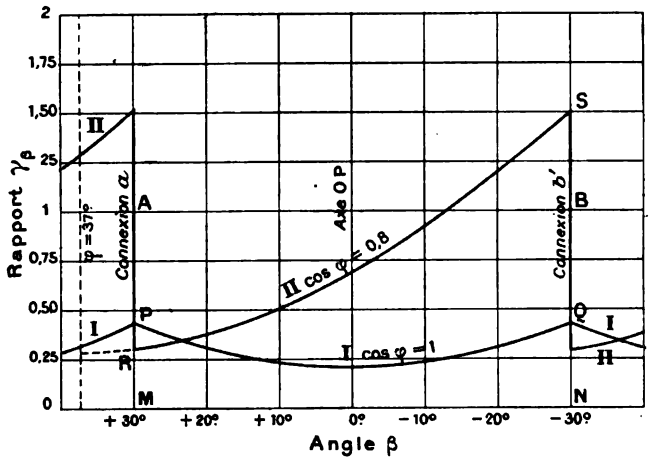
$$\beta = 0, \qquad \gamma_\beta = 1,889 - 1,698 = 0,191,$$

$$\beta = \pm\frac{\pi}{6}, \qquad \gamma_\beta = 1,889 - 1,698\,\frac{1,732}{2} = 0,419.$$

Digitized by Google

Ce sont les spires situées à égale distance des points de connexion avec les bagues qui chauffent le moins, tandis que les spires adjacentes à ces points de connexion subissent l'échauffement maximum (courbe PQ de la figure 160).

Fig. 160.



La perte totale de puissance dans l'enroulement de l'armature est, R désignant la résistance de la moitié de cet enroulement,

$$(10)\quad \begin{cases} W = 6\displaystyle\int_{\beta=-\frac{\pi}{6}}^{\beta=+\frac{\pi}{6}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2 \left(1,889 - \frac{16}{3\pi}\cos\beta\right) \\ \quad = 2RI^2 \dfrac{3}{\pi}\displaystyle\int_{\beta=-\frac{\pi}{6}}^{\beta=+\frac{\pi}{6}} \left(1,889 - \frac{16}{3\pi}\cos\beta\right) d\beta, \end{cases}$$

$$(11)\qquad W = 2RI^2\left(1,889 - \frac{16}{\pi^2}\right) = 2RI^2 \times 0,268.$$

La perte de puissance dans l'enroulement de l'armature du convertisseur à courant hexaphasé, pour un facteur de puissance égal à l'unité, est égale à environ 27 pour 100 de la perte de puissance $2RI^2$ qui se produirait si la machine,

Digitized by Google

fonctionnant comme dynamo mue mécaniquement, fournissait le même courant continu 2I.

Si l'on veut que la perte en watts dans l'enroulement de l'armature soit la même dans les deux cas, la puissance du convertisseur à courant hexaphasé sera accrue dans un rapport K tel qu'on ait

$$2R(I^2K^2) \times 0,268 = 2RI^2,$$

d'où

$$(12) \qquad K = \frac{1}{\sqrt{0,268}} = \frac{1}{0,518} = 1,93.$$

Donc, *si le facteur de puissance est égal à l'unité, et la tension primaire sinusoïdale, la puissance d'un convertisseur à courant hexaphasé est supérieure de* 93 *pour* 100 *à celle de la machine fonctionnant comme dynamo ordinaire.*

Admettons maintenant que le courant primaire a un retard de phase φ par rapport à la tension. Pour la même puissance que précédemment, le courant résultant dans la bobine Q est

$$(13) \quad i' = I - \frac{\frac{4}{3}I}{\cos\varphi}\sin(\alpha - \varphi) = I\left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha + \frac{4}{3}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right).$$

La perte de puissance dans la bobine Q, à l'instant t, a donc pour expression

$$(14) \qquad ri'^2 = rI^2\left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha + \frac{4}{3}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right)^2$$

et la perte moyenne de puissance dans cette bobine est

$$(15) \quad \zeta = 2n\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta} rI^2\left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha + \frac{4}{3}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right)^2 \frac{d\alpha}{2\pi n},$$

$$(16) \quad \zeta = rI^2\frac{1}{\pi}\int_{\alpha=\beta}^{\alpha=\pi+\beta}\left(1 - \frac{4}{3}\sin\alpha + \frac{4}{3}\operatorname{tang}\varphi\cos\alpha\right)^2 d\alpha,$$

$$(17) \quad \zeta = rI^2\left(\frac{17}{9} - \frac{16}{3\pi}\cos\beta - \frac{16}{3\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \frac{8}{9}\operatorname{tang}^2\varphi\right).$$

Digitized by Google

Le facteur

$$(18)\quad \gamma_\beta = \frac{17}{9} - \frac{16}{3\pi}\cos\beta - \frac{16}{3\pi}\operatorname{tang}\varphi\sin\beta + \frac{8}{9}\operatorname{tang}^2\varphi$$

est minimum pour

$$\frac{16}{3\pi}\sin\beta - \frac{16}{3\pi}\operatorname{tang}\varphi\cos\beta = 0$$

ou

$$\operatorname{tang}\beta = \operatorname{tang}\varphi,$$

sous condition que l'angle φ soit inférieur ou au plus égal à $\frac{\pi}{6}$. Si φ est supérieur à $\frac{\pi}{6}$ ou 30°, γ_β est minimum pour $\beta = +\frac{\pi}{6}$. Ce facteur est maximum pour $\beta = -\frac{\pi}{6}$.

Remarque. — Si le courant présentait une avance de phase φ par rapport à la tension, l'angle φ devrait être affecté du signe —; ce sont alors les spires adjacentes à la connexion a, et situées entre a et P, qui éprouveraient l'échauffement maximum.

Exemple. — Soit

$$\cos\varphi = 0,8,$$
$$\sin\varphi = 0,6,$$
$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{3}{4},$$
$$\varphi = 37°.$$

On a (courbe RS de la figure 160)

$$\gamma_\beta \text{ minimum} = \gamma_{+\frac{\pi}{6}} = 0,285,$$
$$\gamma_\beta \text{ maximum} = \gamma_{-\frac{\pi}{6}} = 1,556$$

et

$$\gamma_0 = 0,691.$$

La perte totale de puissance dans l'enroulement de l'ar-

Digitized by Google

mature est

$$(19)\quad W = 6\int_{\beta=-\frac{\pi}{6}}^{\beta=+\frac{\pi}{6}} \frac{R}{\pi}\, d\beta\, I^2\left(\frac{17}{9} - \frac{16}{3\pi}\cos\beta - \frac{16}{3\pi}\tang\varphi\sin\beta + \frac{8}{9}\tang^2\varphi\right).$$

$$(20)\quad \begin{aligned} W &= 2RI^2\left(\frac{17}{9} - \frac{16}{\pi^2} + \frac{8}{9}\tang^2\varphi\right) \\ &= 2RI^2(0,268 + 0,889\tang^2\varphi). \end{aligned}$$

Exemple. — Soit $\cos\varphi = 0,8$, $\tang\varphi = \frac{3}{4}$, $\varphi = 37°$. On a

$$W = 2RI^2\left(0,268 + \frac{8}{9}\times\frac{9}{16}\right) = 2RI^2 \times 0,768.$$

Pour une même perte en watts dans l'enroulement de l'armature, la puissance du convertisseur à courant hexaphasé sera donc à celle de la dynamo dans un rapport K tel qu'on ait

$$2R(I^2K^2)\times 0,768 = 2RI^2,$$

d'où

$$K = \frac{1}{\sqrt{0,768}} = \frac{1}{0,876} = 1,141.$$

La puissance du convertisseur à courant hexaphasé, pour un facteur de puissance de 0,8, est donc supérieure de 14 pour 100 à celle de la machine utilisée comme dynamo mue mécaniquement.

VI. — *Tableau synoptique relatif aux divers convertisseurs.*

Nous avons admis dans l'étude précédente que le rendement des convertisseurs était égal à l'unité.

Le rendement de ces machines est très élevé; il atteint 96 pour 100 dans les convertisseurs de quelques centaines de kilowatts. Si l'on appelle η le rendement d'un convertisseur, le courant primaire J devra être remplacé dans les calculs précédents par $J\frac{1}{\eta}$.

Le Tableau ci-après indique les puissances relatives des divers convertisseurs dans différentes conditions.

Digitized by Google

TYPE DE MACHINE.	DYNAMO à courant continu.	CONVERTISSEUR A COURANT					
		alternatif.	triphasé.	diphasé.	hexaphasé.	à 12 phases.	à nombre de phases infini (1).
Nombre de phases, ou de bagues, m.....	»	2	3	4	6	12	∞
Perte de puissance dans l'enroulement de l'armature pour une puissance égale à la puissance normale de la dynamo $\cos\varphi = 1$.	1,00	1,38	0,564	0,38	0,268	0,20	0,187
Puissance pour une même perte dans l'enroulement de l'armature. Rendement $\eta = 1$, $\cos\varphi = 1$.	1,00	0,85	1,33	1,62	1,93	2,24	2,31
Puissance pour une même perte dans l'enroulement de l'armature. Rendement $\eta = 1$, $\cos\varphi = 0,8$.	1,00	0,63	0,90	1,03	1,14	»	»
Puissance pour une même perte dans l'enroulement de l'armature. Rendement $\eta = 0,95$, $\cos\varphi = 1$.	1,00	0,82	1,30	1,60	1,91	2,23	2,31

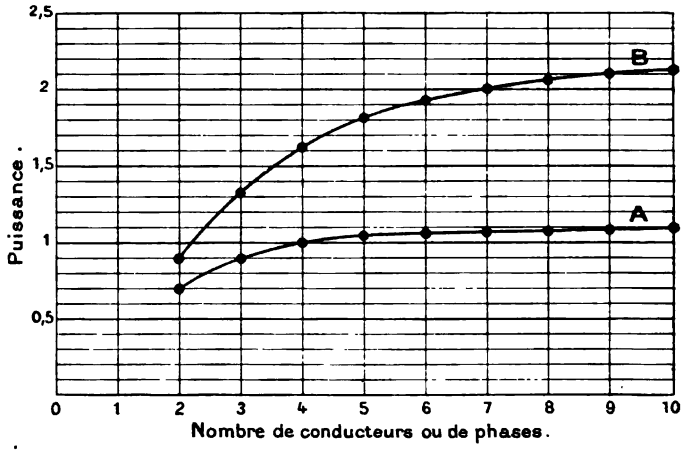
(1) Pratiquement, nombre de bagues égal à celui des lames du commutateur.

Digitized by Google

M. Mershon a représenté graphiquement la puissance d'une dynamo utilisée comme génératrice de courant alternatif, triphasé, diphasé, etc., et comme convertisseur, pour un facteur de puissance égal à l'unité.

La courbe A de la figure 161 indique la puissance de la

Fig. 161.



génératrice en fonction du nombre de phases. La courbe B se rapporte au convertisseur, dont le rendement est supposé égal à 1. La puissance de la machine à courant continu est prise pour unité.

On emploie généralement pour le commutateur des balais de charbon à raison de 5 à 6 ampères par centimètre carré de surface de contact. Les balais métalliques conviennent aux collecteurs à bagues.

VII. — *Réaction d'armature.*

1° *Convertisseur à courant alternatif simple.*

Admettons que le courant primaire coïncide en phase avec la tension. Lorsque le point de connexion *a* se trouve en regard de N, le courant primaire est nul, et les conducteurs

Digitized by Google

de l'armature sont parcourus par le courant continu I qui réagit sur le champ, comme dans le cas d'une dynamo, en produisant une composante transversale qui déplace le champ dans le sens du mouvement de l'armature, c'est-à-dire vers les cornes polaires C, C_1 (*fig.* 153, p. 322). A ce moment la puissance primaire est nulle.

Un quart de période plus tard, le point de connexion *a* étant en regard de A, le courant primaire est maximum et égal au double du courant continu. La moitié du courant primaire passe directement aux balais A, B, et l'autre moitié se divise entre les deux circuits de l'armature, en sens contraire du courant continu. L'action de ce courant sur le champ est égale et de sens contraire à celle du courant continu dans la première phase; le champ dans l'entrefer se trouve, par suite, déplacé de la même quantité vers les cornes polaires C', C'_1. L'armature est alors soumise à un couple accélérateur égal au couple retardateur de la première phase.

Pendant la seconde moitié de la période, les mêmes phénomènes se reproduisent dans le même ordre. La réaction d'armature imprime donc au champ un nombre d'oscillations complètes par seconde égal au double de la fréquence du courant alternatif.

A chaque demi-oscillation du champ correspond un déplacement de la ligne neutre successivement à droite et à gauche de la ligne AB des balais. Il est donc difficile d'éviter les étincelles au commutateur du convertisseur à courant alternatif simple. On peut réduire la réaction d'armature et, par suite, les crachements aux balais en adoptant un champ intense.

La puissance fournie au convertisseur est nulle deux fois par tour; elle est maximum et double de la puissance moyenne également deux fois par tour ou, d'une façon générale, par période. L'armature tend donc à prendre un mouvement non uniforme rendant la tension et le courant continus pulsatoires. L'armature faisant ainsi office de volant doit avoir un moment d'inertie suffisant pour que sa vitesse soit sensiblement constante.

Digitized by Google

2° *Convertisseurs à courant polyphasé.*

Admettons que le courant et la tension primaires coïncident en phase, et supposons le rendement égal à l'unité. Soit $2\mathrm{I}$ le courant continu.

Convertisseur à courant diphasé. — La puissance primaire à un instant t quelconque est, en désignant par e_1, e_2, i_1, i_2 les tensions et les courants instantanés aux deux paires de bagues,

$$(1)\quad \left\{\begin{aligned} e_1 i_1 + e_2 i_2 &= 2\mathrm{IE}_c\left[\sin^2 2\pi nt + \sin^2\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right)\right] \\ &= 2\mathrm{IE}_c(\sin^2 2\pi nt + \cos^2 2\pi nt) \\ &= 2\mathrm{IE}_c. \end{aligned}\right.$$

La puissance primaire est donc constamment égale à la puissance secondaire.

Convertisseur à courant triphasé. — La tension efficace E' entre deux bagues est

$$\mathrm{E}' = \frac{\mathrm{E}_c\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$$

et le courant efficace dans un conducteur de l'armature

$$\mathrm{J} = \frac{4\sqrt{2}}{3\sqrt{3}}\,\mathrm{I}.$$

La puissance primaire à un instant t quelconque est donc

$$(2)\quad \left\{\begin{aligned} &e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 \\ &= \frac{4}{3}\mathrm{IE}_c\left[\sin^2 2\pi nt + \sin^2\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right)\right. \\ &\qquad\qquad \left. + \sin^2\left(2\pi nt - \frac{4\pi}{3}\right)\right] = 2\mathrm{IE}_c. \end{aligned}\right.$$

La puissance primaire est donc constamment égale à la puissance secondaire.

Convertisseur à courant hexaphasé. — Nous avons vu que la tension efficace entre deux points consécutifs de connexion

Digitized by Google

aux bagues est

$$E' = \frac{E_c}{2\sqrt{2}}$$

et le courant efficace dans un conducteur de l'armature

$$J = \frac{2\sqrt{2}}{3} I.$$

En observant que les sinus de deux angles différant de π sont égaux et de signes contraires, la puissance primaire à un instant t quelconque a pour expression

$$(3)\quad \left\{ \begin{aligned} P &= \frac{2}{3} IE_c . 2 \left[\sin^2 2\pi nt + \sin^2\left(2\pi nt - \frac{\pi}{3}\right) \right. \\ &\qquad \left. + \sin^2\left(2\pi nt - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ &= \frac{2}{3} IE_c . 2 \left(\frac{3}{2} \sin^2 2\pi nt + \frac{3}{2} \cos^2 2\pi nt \right) \\ &= 2 IE_c. \end{aligned} \right.$$

La puissance primaire est donc encore constamment égale à la puissance secondaire.

Donc, si le rendement des convertisseurs *à courant polyphasé* était égal à l'unité, il n'y aurait à un instant quelconque aucun effort tangentiel entre l'inducteur et l'armature. Il ne se produirait par suite pas de distorsion du champ.

En réalité, les convertisseurs absorbent une certaine puissance consommée par les pertes électriques, magnétiques et mécaniques, de telle sorte qu'en général les réactions d'armature dans un convertisseur à courant polyphasé sont dues à trois causes principales :

1° Le faible courant correspondant à la puissance perdue dans le convertisseur engendre des ampères-tours en quadrature avec ceux du champ principal, et produit par conséquent une distorsion du champ dont la valeur est du reste négligeable.

2° Si le courant et la tension primaires ne coïncident pas en phase, la composante sans puissance de ce courant produit dans l'armature des ampères-tours qui s'ajoutent ou se re-

Digitized by Google

tranchent directement de ceux de l'inducteur, suivant que la phase du courant est en retard ou en avance sur celle de la tension.

3° Considérons un convertisseur à m phases, dont nous supposerons le rendement égal à l'unité, ainsi que le facteur de puissance, et appelons α l'angle que fait l'axe OP d'une section ab' (voir *fig.* 159, p. 346) avec la ligne neutre AB. Le courant résultant dans une spire située dans un plan méridien OX (non représenté sur la figure) coupant cette section et faisant un angle donné x avec OA, est, à l'instant t,

$$i = \pm \mathrm{I} - \mathrm{J}\sqrt{2}\sin\alpha.$$

Le courant continu I étant affecté du signe + ou du signe — suivant que l'angle x est compris entre o et π, ou entre π et 2π.

Pendant que α variera de $x - \frac{\pi}{2m}$ à $x + \frac{\pi}{2m}$, ce courant résultant variera lui-même de

$$\pm \mathrm{I} - \mathrm{J}\sqrt{2}\sin\left(x - \frac{\pi}{2m}\right)$$

à

$$\pm \mathrm{I} - \mathrm{J}\sqrt{2}\sin\left(x + \frac{\pi}{2m}\right).$$

Il se produira donc en chaque point du champ une réaction d'armature variable, de nature oscillante, dont la fréquence est égale au produit de la fréquence de la tension primaire par le nombre de phases m.

VIII. — *Courants sans puissance et compoundage.*

La polarisation due au courant de travail de la machine fonctionnant comme moteur est en quadrature avec l'excitation du champ et en avance; l'action magnétisante de la composante en retard du courant primaire est donc en coïncidence avec l'excitation du champ; c'est-à-dire que dans les convertisseurs à courant polyphasé, comme nous venons de le voir, il n'y a pas de distorsion du champ ni de réaction d'armature si le courant primaire coïncide en phase avec la

Digitized by Google

tension aux bagues (en négligeant l'action du faible courant correspondant aux pertes dans le convertisseur), tandis que la réaction d'armature est démagnétisante si la phase du courant est en avance, et magnétisante si la phase du courant est en retard.

De la sorte, si le courant primaire, polyphasé ou alternatif, est en retard sur la tension, l'excitation du champ, pour une tension donnée aux bagues, doit être plus faible, et, si le courant primaire est en avance sur la tension, l'excitation du champ doit être plus grande que celle qui serait nécessaire si le courant primaire coïncidait en phase avec la tension.

Inversement, en accroissant l'excitation du champ on peut produire une avance de phase du courant primaire, et en réduisant cette excitation on peut déterminer un retard de phase du courant primaire dans un convertisseur, comme du reste dans un moteur synchrone.

Puisque, pour une tension primaire constante, le courant primaire peut être rendu magnétisant ou démagnétisant, suivant la valeur de l'excitation du champ, on peut faire varier cette excitation entre des limites éloignées sans affecter notablement la tension du courant continu. Les convertisseurs à réaction d'armature élevée et à champ relativement faible peuvent même supporter sans caler leur charge normale, et même une surcharge, sans aucune excitation sur leur inducteur, l'excitation du champ étant produite dans ce cas par la réaction d'armature due à la composante en retard du courant primaire.

On peut donc construire des convertisseurs dont l'inducteur est constitué uniquement par une carcasse magnétique ne portant aucun enroulement. Ces convertisseurs sans enroulement inducteur, ou *convertisseurs à réaction*, fonctionnent donc toujours avec un courant primaire ayant une composante en retard, et produisent par conséquent sur la distribution la même réaction que les moteurs asynchrones.

Pour réduire au minimum cette composante en retard, on donne à l'entrefer la plus petite longueur possible.

Si nous considérons un convertisseur exigeant une composante en retard égale à 40 pour 100 du courant primaire de travail à pleine charge, le facteur de puissance pour diffé-

Digitized by Google

rentes charges aux bornes primaires a les valeurs suivantes :

A pleine charge :

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \overline{0,4}^2}} = 0,93;$$

A demi-charge :

$$\cos\varphi = \frac{0,5}{\sqrt{\overline{0,5}^2 + \overline{0,4}^2}} = 0,78;$$

A quart de charge :

$$\cos\varphi = \frac{0,25}{\sqrt{\overline{0,25}^2 + \overline{0,4}^2}} = 0,53.$$

Réciproquement, pour une tension primaire constante, la tension du courant continu d'un convertisseur ne peut pas être modifiée (sauf dans une très faible proportion, par suite d'un léger changement dans le rapport de conversion) en faisant varier l'excitation du champ. En modifiant cette excitation, on produit seulement une composante sans puissance du courant primaire, en retard ou magnétisante dans le cas de sous-excitation, en avance ou démagnétisante dans le cas de surexcitation du champ.

Ainsi, pour modifier la tension du courant continu d'un convertisseur, il est nécessaire de modifier la tension primaire. Ce résultat peut être obtenu soit par un régulateur de tension, ou compensateur, constitué par un transformateur à rapport de transformation variable dans lequel un cadran à touches permet de faire varier le nombre de spires primaires ou secondaires en série, soit par l'action d'une composante sans puissance du courant sur la self-induction. Cette dernière méthode convient particulièrement aux convertisseurs, grâce à la facilité avec laquelle on leur fait produire des courants sans puissance par la simple modification de l'excitation de leur champ.

La force électromotrice de self-induction est en retard de 90° sur le courant. Si ce dernier est lui-même en retard de 90° sur la force électromotrice imprimée, la force électromotrice de self-induction se trouve en retard de 180°, ou en

Digitized by Google

opposition avec la force électromotrice imprimée dont, par suite, elle se retranche directement. Si le courant est en avance de 90° sur la tension, la force électromotrice de self-induction se trouve en phase avec la force électromotrice imprimée, à laquelle elle s'ajoute directement.

Ainsi, si l'on intercale une self-induction dans les canalisations entre le convertisseur et la génératrice fournissant une tension constante, et si l'on détermine la production d'une composante sans puissance en retard, en diminuant l'excitation du convertisseur, la force électromotrice de self-induction de cette composante dans la ligne réduit la tension primaire aux bornes du convertisseur et, par suite, également la tension du courant continu. Si, au contraire, on produit une composante du courant en avance, par l'accroissement de l'excitation du convertisseur, la force électromotrice de self-induction engendrée dans la ligne par cette composante en avance augmente la tension primaire aux bornes du convertisseur, et par suite aussi la tension du courant continu.

La self-induction dans les canalisations conduisant au convertisseur permet ainsi de faire varier la tension en modifiant l'excitation de l'inducteur.

On peut donc de la sorte maintenir la tension constante pour une charge croissante du convertisseur donnant lieu par conséquent à une augmentation de la chute de tension par résistance dans la canalisation, tout en maintenant la tension constante aux bornes de la génératrice, ou même en laissant invariable l'excitation de cette machine.

On peut encore faire croître la tension du convertisseur en même temps que sa charge, c'est-à-dire que le convertisseur peut être surcompoundé.

Il est aisé de faire varier automatiquement l'excitation du convertisseur avec la charge, en adjoignant aux bobines d'excitation shunt une seconde série de bobines parcourues par la totalité ou par une fraction déterminée du courant continu produit par le convertisseur. L'effet de compoundage ou de surcompoundage sur le convertisseur est le même que pour une génératrice, mais ce compoundage a lieu non pas dans le convertisseur même, comme cela se produit dans la dynamo, mais bien dans les canalisations amenant le courant

Digitized by Google

primaire au convertisseur, dans lesquelles la self-induction est ainsi indispensable.

On peut suppléer à cette self-induction, ou la renforcer, en montant une bobine de réaction en série avec chaque conducteur alimentant le convertisseur.

La batterie d'accumulateurs du chemin de fer de Middlesbrough, Stockton et Thornaby est chargée au moyen d'un convertisseur recevant le courant triphasé et desservi par un transformateur à forte dispersion magnétique. Si l'on règle l'excitation du convertisseur en dessous ou en dessus de la valeur donnant un facteur de puissance égal à l'unité, on produit une composante du courant en retard, ou une composante en avance, qui, réagissant sur le transformateur, réduit ou augmente respectivement la tension aux bornes secondaires de ce transformateur, et par suite également la tension du courant continu. Ce réglage s'effectue donc par la simple manœuvre du rhéostat de champ du convertisseur.

IX. — *Démarrage des convertisseurs.*

Il existe quatre méthodes principales pour le démarrage des convertisseurs de courant polyphasé en courant continu.

En règle générale, le démarrage s'effectue sans charge sur le convertisseur.

Première méthode. — Elle consiste à faire démarrer le convertisseur comme moteur à courant continu, à vide. C'est à cette méthode que l'on donne la préférence toutes les fois que l'on dispose d'une source de courant continu convenable. C'est le cas lorsque le réseau est alimenté en même temps par une batterie d'accumulateurs ou par d'autres machines, convertisseurs ou génératrices, dont une au moins assure un service ininterrompu.

On excite l'inducteur du convertisseur, et on lance le courant continu dans son armature, en intercalant un rhéostat. Comme le démarrage s'effectue sans charge, la puissance du courant continu nécessaire est peu élevée, puisqu'elle représente seulement les pertes mécaniques, par hystérésis et par

Digitized by Google

courants de Foucault, pertes qui sont petites dans un convertisseur à courant polyphasé. Le rhéostat est donc d'assez faible importance, et peut même, dans certains cas, être non gradué. La résistance doit être assez grande pour que la distribution ne soit pas troublée lorsqu'on lance le courant sur l'armature, et elle doit cependant être suffisamment faible pour permettre d'amener le convertisseur près du synchronisme, et pour que la mise hors circuit de ce rhéostat ne trouble pas la distribution et n'endommage pas le convertisseur. On ajuste la vitesse pour le synchronisme au moyen du rhéostat de champ.

Cette méthode exige évidemment l'emploi d'un synchronoscope, formé de lampes à incandescence en série ou d'un voltmètre à courant alternatif reliés aux bagues du convertisseur et à deux barres du tableau, comme nous l'avons vu à propos des génératrices (p. 80).

Deuxième méthode. — Dans la plupart des cas on dispose uniquement du courant polyphasé pour le démarrage. Si l'inducteur du convertisseur porte un enroulement en série dont l'une des extrémités est connectée à l'une des broches du commutateur, on peut relier momentanément le circuit formé de cet enroulement et de l'armature du convertisseur à l'une des sections de la canalisation à courant polyphasé; on obtient ainsi un moteur à courant alternatif excité en série dans lequel la polarité de l'armature et celle de l'inducteur alternent simultanément, en donnant, par suite, naissance à un couple de sens constant. Le couple nécessaire pour le démarrage à vide est du reste faible, mais, comme pour tout moteur excité en série, la vitesse est instable et il est difficile de la maintenir avec assez de précision pour permettre de saisir aisément l'instant propice pour changer les connexions pour la marche normale.

Troisième méthode. — La *Westinghouse Electric and Manufacturing Company* prolonge l'arbre du convertisseur au delà de l'un des paliers, et cale sur ce prolongement l'induit en cage d'écureuil d'un moteur asynchrone dont l'inducteur, extérieur, est boulonné sur une console portée par le palier. Ce moteur, n'ayant qu'à vaincre les frottements et à couvrir

Digitized by Google

les pertes dans le fer et dans les bobines de l'inducteur, est d'une puissance relativement faible.

L'induit en court-circuit a une grande résistance, afin d'assurer un couple élevé au début du démarrage, couple qui diminue du reste au fur et à mesure que la vitesse du convertisseur croît. Si l'inducteur du moteur asynchrone avait le même nombre de pôles que le convertisseur, il serait impossible d'obtenir le synchronisme. On donne donc à cet inducteur un nombre de pôles un peu supérieur à celui du convertisseur, de façon que la vitesse puisse dépasser un peu le synchronisme; on effectue l'accouplement à l'instant où la vitesse du convertisseur continuant à croître passe par le synchronisme. Celui-ci est indiqué par un groupe de lampes à incandescence en série.

Pendant le démarrage, le convertisseur se comporte comme une dynamo shunt mue mécaniquement pendant l'amorçage. Il s'excite peu à peu, grâce au magnétisme rémanent, au fur et à mesure que sa vitesse augmente. La tension aux bagues ainsi que la fréquence de cette tension croissent donc d'une manière continue.

Au début, les lampes du synchronoscope fonctionnant sous une tension voisine de celle des barres du tableau éclairent peu, puis donnent des battements fréquents; la vitesse du convertisseur augmentant, les lampes deviennent de plus en plus brillantes et les battements de moins en moins fréquents, puis les lampes s'éteignent, indiquant que le synchronisme est atteint. Si alors on laissait le convertisseur s'accélérer, les battements réapparaîtraient. Après l'accouplement, on règle le champ du convertisseur.

Le démarrage s'effectue donc sans manœuvre de rhéostat sur le moteur d'induction.

Un voltmètre à aimant permanent indique si la polarité de l'inducteur n'a pas été inversée.

Quatrième méthode. — Ce procédé, qui est employé en particulier par la *General Electric Company*, consiste à faire démarrer le convertisseur comme un moteur synchrone à courant polyphasé, sans charge, en connectant l'armature à la canalisation à courant polyphasé.

Digitized by Google

Le courant polyphasé circulant dans l'enroulement de l'armature engendre un champ tournant qui, réagissant sur les pièces polaires, produit un couple moteur suffisant pour faire démarrer la machine sans charge, et pour amener la vitesse jusqu'au synchronisme.

Pendant le démarrage, la tension aux balais du commutateur est alternative et sa fréquence est égale au produit de la fréquence du courant polyphasé par le rapport de la différence entre la vitesse du synchronisme et la vitesse à l'instant considéré. Une série de lampes ou un voltmètre, connectés à ces balais ou à l'enroulement de l'inducteur, indiquent par leurs battements, ou par la déviation de l'aiguille, l'approche du synchronisme.

Lorsque les pôles sont laminés, le démarrage est un effet d'hystérésis sur le champ tournant. Si les pièces polaires sont massives, elles agissent comme secondaire en court-circuit dans lequel le champ tournant induit des courants, et à l'effet d'hystérésis s'ajoute la réaction de ces courants sur le flux tournant.

Pendant le démarrage, l'enroulement shunt de l'inducteur doit être ouvert; dans le cas contraire, le champ tournant y engendrerait des courants intenses qui produiraient une forte dispersion magnétique et accroîtraient le courant absorbé par le convertisseur, tout en réduisant le couple moteur. Si l'inducteur porte un enroulement en série, celui-ci doit également être ouvert, sans quoi le courant qui y serait induit se fermerait par le shunt d'ajustage.

Au début du démarrage, l'enroulement de l'inducteur se trouve dans la position d'un secondaire par rapport à l'enroulement de l'armature comme primaire. Le nombre de spires de l'enroulement shunt étant en général beaucoup plus grand que celui des spires de l'armature, des forces électromotrices considérables, atteignant fréquemment 4000 et même 6000 volts, peuvent être induites dans l'enroulement inducteur. On évite la production de ces forces électromotrices élevées au moyen d'un commutateur qui, à la mise en marche, sépare toutes les bobines inductrices les unes des autres : on a de la sorte au maximum la tension engendrée dans une bobine.

Digitized by Google

Pendant le démarrage, le champ est engendré par une composante en retard du courant polyphasé. Cette composante sans puissance est d'autant plus grande que la réluctance du circuit magnétique est plus considérable. Un entrefer de faible longueur et un développement des pôles relativement grand, et par suite une réaction d'armature élevée, facilitent donc le démarrage en réduisant le courant absorbé par le convertisseur pendant cette opération.

En général, si l'on connectait directement l'armature au repos du convertisseur à la canalisation à courant polyphasé, le courant absorbé serait énorme et pourrait amener des troubles dans la distribution, et même détériorer le convertisseur. On évite cet inconvénient en intercalant momentanément une bobine de réaction sur chaque conducteur amenant le courant au convertisseur, ou encore en réduisant la tension au moyen d'un transformateur spécial.

Lorsque le synchronisme est atteint, le champ produit par l'armature devient fixe dans l'espace, s'attache aux pôles et se ferme par la carcasse magnétique de l'inducteur. Ce champ est engendré par la composante en retard du courant.

Le courant absorbé par le convertisseur à vide, au démarrage, est environ le double du courant en charge normale ; il est presque sans puissance.

Lorsque le synchronisme est établi, on ferme l'enroulement shunt sur les balais du commutateur, puis on met les bobines de réaction en court-circuit, ou, si l'on emploie un transformateur à réduction, on établit les connexions pour la tension normale. L'intensité du courant absorbé diminue alors considérablement. Puis on met la charge sur le convertisseur, et l'on règle éventuellement le shunt de l'enroulement en série.

La mise en court-circuit par les balais des bobines où le champ tournant produit au démarrage des courants intenses semble ne donner lieu à aucun trouble.

Le flux peut s'attacher à un pôle quelconque et, par suite, inverser la polarité de l'inducteur et par conséquent aussi la force électromotrice engendrée dans l'armature entre deux balais. Si la machine s'excite elle-même, cette polarité inversée subsiste quand on ferme l'excitation. Si le convertis-

Digitized by Google

seur doit fonctionner en quantité avec d'autres machines sur le réseau à courant continu, on établit la connexion convenable avec les barres à courant continu du tableau à l'aide d'un commutateur; ou bien on redresse la polarité en excitant le convertisseur au moyen des machines déjà en fonctionnement. Si l'excitation est indépendante, prise sur les barres du tableau, l'armature saute à sa position normale dès qu'on ferme l'excitation.

La polarité des balais est indiquée par un voltmètre à aimant permanent.

Le convertisseur à courant alternatif simple ne démarre évidemment pas automatiquement.

X. — *Choix de la fréquence.*

Pour un nombre de tours par minute déterminé, le nombre de pôles inducteurs est proportionnel à la fréquence. Ces pôles ne doivent pas être trop rapprochés, afin de ne pas donner lieu à une dispersion magnétique exagérée. La vitesse périphérique de l'armature doit donc être d'autant plus grande que la fréquence est plus élevée.

D'autre part, une tension déterminée impose une distance minimum entre deux jeux consécutifs de balais, afin qu'une variation brusque de charge venant à déplacer la ligne neutre, ou un léger défaut de propreté du commutateur ne risquent pas d'amorcer des arcs entre les jeux successifs de balais. Cette condition oblige à augmenter la vitesse périphérique du commutateur à la fois avec la tension et avec la fréquence.

Le coût d'un convertisseur croît avec le nombre de pôles.

La fréquence la plus appropriée à un convertisseur dépend donc de plusieurs facteurs dont les principaux sont :

La tension aux bornes, ou entre deux jeux consécutifs de balais;

Le nombre de pôles;

La vitesse périphérique de l'armature;

La vitesse périphérique du commutateur.

Digitized by Google

Cette fréquence est d'autant plus faible que la tension est plus élevée.

La vitesse périphérique moyenne adoptée pour l'armature est d'environ 25^m par seconde. Pour les fréquences élevées on va jusqu'à 35^m par seconde et au delà.

La vitesse périphérique normale du commutateur est de 15^m à 20^m par seconde; la vitesse maximum est 25^m par seconde. Une vitesse exagérée du commutateur pourrait faire vibrer les balais et, par suite, donner lieu à des étincelles, et en outre entraînerait une perte notable par le frottement des balais. On détermine en général le nombre de segments du commutateur en adoptant une tension moyenne de 10 à 15 volts par lame.

Un convertisseur fonctionnant avec une fréquence élevée a donc une vitesse circonférentielle importante; l'énergie cinétique qu'il emmagasine est par conséquent plus considérable que celle d'un convertisseur de même puissance et de même tension fonctionnant avec une fréquence moindre, de telle sorte qu'il est moins apte à suivre les petites oscillations de la fréquence et, par suite, plus sujet au mouvement pendulaire.

Les considérations qui précèdent ont conduit à adopter pour les convertisseurs à la tension de 500 à 600 volts, tels que ceux destinés à la traction, une fréquence de 25 périodes par seconde. Pour les convertisseurs de 120 à 250 volts desservant un réseau d'éclairage et, par suite, peu sujets à des variations brusques de charge, on peut adopter 50 périodes par seconde; on a même obtenu des résultats satisfaisants avec des fréquences de 60 et de 66 périodes par seconde.

Au-dessous de 25 périodes par seconde, les transformateurs statiques seraient d'un prix élevé et auraient un rendement médiocre.

XI. — *Mouvement pendulaire.*

Si la tension aux bagues du convertisseur a des oscillations de fréquence, elle peut imprimer au convertisseur un mouvement pendulaire, c'est-à-dire un mouvement de rotation alternativement et périodiquement accéléré et retardé, lequel

Digitized by Google

produit des pulsations dans la tension du courant continu, et, par suite, dans la puissance secondaire.

Ces variations de vitesse, au-dessus et au-dessous de la vitesse synchronique, qui peuvent être constatées à l'aide d'un tachymètre, sont parfois assez intenses pour amener le convertisseur hors synchronisme.

Tantôt la puissance fournie au convertisseur accélère le mouvement de son armature, tantôt celle-ci restitue sous forme de courant continu une puissance supérieure à celle qu'elle reçoit. Il en résulte que la réaction d'armature, qui est très faible dans les conditions normales, devient assez considérable, et se produit alternativement dans les deux sens; le champ dans l'entrefer subit donc des déplacements continuels d'une corne polaire à l'autre. On constate aisément ces oscillations du champ en approchant d'un pôle une pièce de fer que l'on sent vibrer dans la main.

On a imaginé, pour empêcher ce mouvement pendulaire, divers dispositifs qui ont tous pour but d'amortir les vibrations du champ.

Tout d'abord il convient de ne pas employer des pôles laminés, mais au contraire des pôles massifs; les courants de Foucault développés par les oscillations du champ dans les masses métalliques tendent à amortir ces vibrations.

M. Lamme fixe sous chacune des cornes polaires du noyau massif une lame de cuivre méplate, et en outre entoure la pièce polaire d'un fort cadre de cuivre. Ce procédé est appliqué par la Compagnie Westinghouse.

La *General Electric Company* fixe entre deux cornes polaires voisines un pont formé d'une plaque de cuivre épaisse qui vient s'engager sous l'extrémité des cornes polaires.

On pourrait encore employer l'amortisseur Leblanc.

XII. — *Convertisseur inversé.*

Dans certains cas une usine génératrice à courant continu fournissant l'éclairage à une ville peut avoir à desservir en

Digitized by Google

même temps des localités éloignées, telles que des quartiers de banlieue. Quelques installations de tramways de ville comprennent des lignes desservant des localités voisines, et de trop grande longueur pour pouvoir être alimentées directement par le courant continu de l'usine génératrice.

Dans ces circonstances, le transport de la puissance aux localités éloignées exige l'emploi du courant alternatif ou polyphasé à haute tension. Ce service peut être assuré par des génératrices à courant polyphasé.

Si la puissance à transporter n'est pas une fraction importante de la puissance totale de l'usine, on peut avoir intérêt, au point de vue de l'homogénéité et de la simplicité du service, à n'installer que des groupes à courant continu, et à transformer une partie de cette puissance en courant polyphasé. Ce résultat s'obtient aisément au moyen de convertisseurs recevant le courant continu, et fournissant sur leur collecteur à bagues le courant polyphasé.

La tension du courant alternatif ou polyphasé aux bornes d'un convertisseur étant inférieure à celle du courant continu qui, dans la pratique, est au maximum de quelques centaines de volts, on est obligé, dans la plupart des cas, d'adjoindre aux convertisseurs inversés des transformateurs donnant la tension appropriée au transport.

Le démarrage d'un convertisseur inversé s'effectue comme celui d'un moteur à courant continu excité en dérivation, au moyen d'un rhéostat monté en série avec l'armature. Comme le convertisseur démarre sans charge, ce rhéostat est peu considérable.

Nous avons vu que lorsqu'un convertisseur transforme un courant polyphasé ou alternatif en courant continu, sa vitesse est fixée d'une manière invariable par la fréquence, et qu'en modifiant son excitation on ne peut que changer la relation de phase du courant polyphasé et de sa tension.

Lorsque le convertisseur transforme un courant continu en courant polyphasé, sans être accouplé en quantité avec d'autres génératrices de courant polyphasé fixant la fréquence, le convertisseur a, comme moteur à courant continu excité en dérivation, une vitesse qui dépend de l'intensité du champ. D'autre part, si la tension du courant continu est in-

Digitized by Google

variable, il en est de même de celle du courant polyphasé, et par suite la puissance fournie est, entre certaines limites, indépendante de la vitesse du convertisseur. Un affaiblissement du champ accroît la vitesse, et un renforcement du champ la diminue, sans que la puissance secondaire exerce aucune action régulatrice.

Comme génératrice de courant polyphasé, le convertisseur inversé a un champ dont la valeur dépend à la fois de l'intensité du courant engendré et de la différence de phase entre ce courant et la tension aux bornes. Un courant en retard réduit le champ et accroît par suite la vitesse et la fréquence, tandis qu'un courant en avance augmente l'intensité du champ et, par conséquent, diminue la vitesse et la fréquence.

L'application d'une charge inductive, telle que celle produite par la mise en marche d'un moteur d'induction ou par le démarrage d'un convertisseur au moyen du courant polyphasé, peut accélérer le mouvement du convertisseur inversé assez rapidement pour qu'il soit impossible d'arrêter cette accélération au moyen du rhéostat de champ, et la vitesse peut devenir dangereuse. Il est donc nécessaire de prévoir, pour les convertisseurs inversés desservant des appareils retardant le courant, des dispositifs qui assurent une vitesse peu variable, par exemple par le réglage automatique et rapide de l'excitation de ces convertisseurs, ou qui coupent la charge dès que la vitesse atteint la limite dangereuse.

Si le convertisseur inversé fonctionne en quantité avec des génératrices de courant polyphasé assez puissantes pour ne pas être sensiblement influencées par le convertisseur, ou si les moteurs de ces génératrices sont munis de régulateurs maintenant la vitesse constante, la vitesse du convertisseur est elle-même invariable, et toute modification de son excitation ne peut avoir comme effet que de donner naissance à une composante du courant, sans puissance, en avance ou en retard. Le convertisseur inversé peut donc être utilisé pour compenser éventuellement une composante sans puissance dans la distribution.

M. Lamme obtient le réglage de la vitesse du convertisseur inversé par le dispositif suivant :

Digitized by Google

Le convertisseur est excité séparément par une excitatrice shunt calée sur le prolongement de l'arbre du convertisseur. Le fer de cette dynamo travaille, dans les conditions normales, à une faible induction, au-dessous du coude de la courbe d'aimentation, de telle sorte que cette machine est extrêmement sensible. Si la vitesse du convertisseur, et par suite de l'excitatrice, croît légèrement, de 1 ou 2 pour 100 par exemple, la tension fournie par l'excitatrice augmente d'autant plus que son champ croît rapidement; l'excitation, et par suite le champ du convertisseur, augmentant, il y a tendance au ralentissement. Si la vitesse diminue, le champ de l'excitatrice décroît et peut même s'évanouir; le champ du convertisseur se trouve donc réduit et la vitesse tend à augmenter.

L'usine génératrice de la *Union Railway Company*, Providence, possède deux convertisseurs inversés de 300 kilowatts, à 600 tours par minute, fournissant un courant diphasé qui est transformé par des transformateurs accouplés suivant le montage Scott en courant triphasé à 10000 volts. Ce courant est transmis à une sous-station de tramways suburbains située à une distance de $22^{km},5$, et renfermant deux convertisseurs de 250 kilowatts recevant le courant diphasé obtenu par une seconde transformation d'après le système Scott.

XIII. — *Exemples de convertisseurs.*

Voici quelques données sur un petit convertisseur établi par l'auteur pour l'excitation d'une machine à courant triphasé de 150 kilowatts :

Puissance aux bornes, en kilowatts	2
Tension du courant triphasé, en volts	80
Tension du courant continu, en volts	130
Intensité du courant continu, en ampères	15,4
Nombre de tours par minute	1500
Fréquence du courant triphasé, en périodes par seconde	50
Nombre de pôles inducteurs	4

Digitized by Google

Diamètre du noyau d'armature, en millimètres.	234
Longueur du noyau d'armature, en millimètres.	120
Nombre total de spires sur l'armature.....	768
Diamètre des fils de l'armature, en millimètres.	1,3
Nombre de spires par pôle inducteur.....	2244
Diamètre des fils inducteurs, en millimètres...	1,1
Nombre de lames au collecteur	64

L'armature est enroulée en anneau.

La *General Electric Company* a établi des convertisseurs à courant diphasé de 400 kilowatts, à la fréquence de 60 périodes par seconde, et à la vitesse de 450 tours par minute, destinés à alimenter un réseau à trois fils et à charger des accumulateurs.

L'inducteur est formé d'une culasse d'acier coulé, à section en U, en deux parties boulonnées ensemble, dont le diamètre extérieur est $2^{m},400$. Cette culasse, fixée, ainsi que les deux paliers, sur un socle rectangulaire de fonte, porte à l'intérieur 16 noyaux polaires d'acier, à section rectangulaire, munis chacun d'une bobine excitatrice.

L'armature reçoit d'un côté le commutateur à lames sur lequel frottent 16 jeux de 6 balais, et de l'autre le collecteur à quatre bagues.

Deux transformateurs de 220 kilowatts fournissent le courant diphasé dont la tension secondaire peut être variée entre 165 et 220 volts au moyen d'un cadran qui permet de faire varier le nombre de spires primaires. On peut donc régler la tension du courant continu entre 225 et 300 volts.

La Société Alioth a construit un convertisseur de 100 kilowatts, destiné à desservir un réseau à trois fils, composé de deux convertisseurs dont les inducteurs sont boulonnés sur le même socle, et dont les armatures sont calées sur le même arbre. Chaque armature est munie d'un commutateur à lames et d'un collecteur à quatre bagues. Le réglage de la tension sur chaque pont est obtenu en faisant varier le rapport de transformation des deux transformateurs correspondants. Le démarrage s'effectue au moyen du courant diphasé. Si le synchronisme ne s'établit pas sur le pôle convenable, on

Digitized by Google

peut couper le courant diphasé de façon à laisser l'armature glisser d'un pôle, ou bien inverser le courant continu au moyen de commutateurs. Ce redressement de polarité est nécessaire si le convertisseur doit fonctionner en quantité avec d'autres machines, ou s'il alimente des lampes à arc.

La fabrique électrolytique de sodium du Niagara possède trois convertisseurs de 250 HP, utilisant le courant diphasé à 2200 volts, 25 périodes par seconde, de l'usine génératrice du Niagara, par l'intermédiaire de six transformateurs. Ces convertisseurs, analogues à des dynamos multipolaires, fournissent le courant continu à 116 volts. Le sodium est obtenu par le procédé Castner, au moyen de la soude caustique et du peroxyde de sodium.

L'un des convertisseurs, fourni par la Compagnie Westinghouse, ne porte aucun enroulement inducteur. Il a six pôles; l'entrefer est réduit à $1^{mm},6$. Le champ est donc produit par une composante en retard du courant diphasé. Il démarre automatiquement par le courant diphasé.

L'une des sous-stations de Buffalo comporte deux convertisseurs de 200 kilowatts et deux convertisseurs de 100 kilowatts.

Les convertisseurs de 200 kilowatts, desservant les tramways, fournissent une tension de 550 volts, et reçoivent le courant triphasé à 25 périodes par seconde. Ils ont quatre pôles et font 750 tours par minute. Les pièces polaires sont larges, et l'entrefer est de faible longueur, de façon à faciliter le surcompoundage par l'enroulement en série de l'inducteur. Le démarrage s'effectue au moyen du courant triphasé. Chaque inducteur est muni d'un rhéostat de champ et d'un voltmètre. Un commutateur, fixé sur la machine même, permet de découpler les quatre bobines inductrices à la mise en marche.

Un seul jeu de trois bobines de réaction sert au démarrage des deux convertisseurs. Chaque machine est munie de trois commutateurs simples, manœuvrés isolément. Dans sa position inférieure, la palette du commutateur met une bobine de réaction en série avec l'une des sections; dans sa position

Digitized by Google

supérieure, le commutateur connecte cette section directement avec le secondaire du transformateur. Lorsque le synchronisme est atteint, on manœuvre un seul commutateur à la fois, de façon à laisser le convertisseur fonctionner comme moteur à courant alternatif simple.

Afin d'éviter que les balais ne produisent des rainures dans le commutateur, on donne aux balais d'une broche un léger déplacement axial par rapport aux balais des broches voisines. On peut rendre l'usure du commutateur encore plus uniforme en imprimant à l'arbre du convertisseur qui, comme dans toute machine électrique, a un certain jeu longitudinal dans les paliers, un mouvement oscillatoire suivant l'axe, au moyen d'un électro-aimant plat, fixé sur l'extrémité de l'un des paliers, qui attire périodiquement l'un des bouts de l'arbre, et dont l'excitation est produite par la fermeture, à des intervalles de temps définis, de son enroulement sur une source de courant continu.

La *General Electric Company* emploie aussi un procédé mécanique plus simple : l'un des bouts de l'arbre porte une cannelure dans laquelle se meut une bille d'acier retenue par un disque métallique fixé sur l'extrémité du palier et portant un plan incliné. Cette bille imprime périodiquement dans son mouvement de rotation un déplacement axial à l'arbre.

Les convertisseurs de 100 kilowatts alimentent un réseau d'éclairage à trois fils, avec accumulateurs. Ils ont 4 pôles et font 750 tours par minute. La tension normale aux balais du commutateur est 125 volts. Trois transformateurs de 75 kilowatts réduisent la tension de 320 à 80 volts. Sur chacun des trois conducteurs reliant un convertisseur à une borne secondaire des transformateurs sont intercalées en série deux bobines de réaction. Pendant le démarrage ces deux bobines sont en circuit, tandis qu'en marche normale une seule reste intercalée d'une manière permanente, et a pour but de permettre de faire varier la tension du convertisseur en modifiant l'excitation au moyen du rhéostat de champ.

Convertisseur du métropolitain de New-York

Puissance aux bornes secondaires, en kilowatts.....	990

Digitized by Google

Tension du courant continu, en volts.....	550
Intensité normale du courant continu, en ampères.....	1800
Nombre de tours par minute.....	214
Fréquence du courant triphasé, en périodes par seconde.....	25

Inducteur.

Nombre de pôles.....	14
Excitation.....	compound

Armature.

Nombre de cannelures par pôle.....	24
Nombre de barres par cannelure.....	4
Nombre de bobines par pôle.....	48
Nombre de segments du commutateur par pôle.....	48
Poids total du convertisseur en kilogrammes, environ.....	44000
Poids total de l'armature, en kilogrammes, environ.....	15000
Rendement à charge double, pour 100.....	96,8
Rendement à charge normale, pour 100....	96,0
Rendement à demi-charge, pour 100.....	93,6

L'inducteur est formé d'une culasse d'acier coulé de 3400^{mm}, de diamètre extérieur, à section en U, en deux parties boulonnées ensemble, et est fixé, ainsi que les deux paliers, sur un socle rectangulaire de fonte de 3860^{mm} de longueur sur 3000^{mm} de largeur. La longueur totale entre extrémités des paliers est de 3170^{mm}. La culasse porte à l'intérieur 14 noyaux d'acier à section rectangulaire, munis chacun de deux bobines.

Le commutateur à lames et le collecteur à bagues sont fixés de part et d'autre de l'armature.

Le courant primaire est amené, sous forme de courant hexaphasé, par six conducteurs au collecteur à six bagues. Les supports des six jeux de balais sont fixés sur le socle de la machine.

Digitized by Google

Des pièces de cuivre, en deux parties maintenues ensemble par un boulon parallèle à l'axe, enveloppent les paires de cornes polaires en regard, formant ainsi un amortisseur, évidé pour permettre la circulation de l'air.

L'inducteur porte, en outre de l'enroulement shunt, un enroulement en série pour le surcompoundage.

On a prévu, pour la régulation de la tension, deux groupes de bobines de réaction. L'un de ces groupes est formé de six bobines montées en série sur les six conducteurs reliant le convertisseur aux bornes secondaires des transformateurs. Trois autres bobines de réaction sont montées sur chaque feeder au départ de l'usine génératrice. Cette seconde série de bobines a pour but, en outre de la régulation, de limiter le courant dans le feeder en cas de court-circuit.

XIV. — *Applications multiples.*

Le convertisseur se prête à des combinaisons multiples. Ainsi, il peut être utilisé comme :

1° Génératrice de courant continu;

2° Génératrice de courant polyphasé ou alternatif, auto-excitatrice;

3° Génératrice à double courant;

4° Convertisseur de courant polyphasé en courant continu;

5° Convertisseur de courant continu en courant polyphasé;

6° Moteur à courant continu;

7° Moteur synchrone à courant polyphasé ou alternatif.

Enfin, il peut remplir simultanément plusieurs de ces fonctions. Par exemple, un convertisseur peut être utilisé en même temps pour fournir une certaine puissance mécanique comme moteur synchrone. Dans ce cas, le courant polyphasé est égal à la somme des courants correspondant à la puissance du courant continu et à la puissance mécanique. La réaction d'armature est alors sensiblement produite par la fraction du courant polyphasé correspondant à la charge mécanique. Celle-ci augmente également l'échauffement engendré par le courant d'armature.

Un convertisseur inversé peut fournir simultanément une certaine puissance mécanique.

Digitized by Google

Les deux combinaisons précédentes sont praticables, mais elles ont l'inconvénient de gêner le réglage automatique de la tension par compoundage.

Une génératrice à double courant peut être employée pour fournir au réseau à courant polyphasé une puissance supérieure à celle engendrée par son moteur, en empruntant ce supplément de puissance aux génératrices à courant continu. Dans ce cas, une partie de la puissance du courant polyphasé est engendrée par le moteur, et l'autre résulte de la conversion du courant continu. La machine est donc alors la combinaison d'une génératrice de courant polyphasé et d'un convertisseur inversé. Réciproquement, cette machine peut fournir du courant continu, en empruntant au courant polyphasé une partie de la puissance nécessaire.

Un convertisseur peut encore changer l'ordre d'un courant; par exemple, il peut transformer un courant alternatif en courant diphasé ou triphasé.

§ IV. — Divers modes de transformation d'un courant polyphasé en courant continu ou en courant redressé.

I. — *Transformateur de courant polyphasé en courant continu, à inducteur et induit fixes, et à balais tournants.*

Considérons un inducteur annulaire fixe A (*fig.* 162) portant un enroulement, continu ou discontinu, alimenté par un courant diphasé ou triphasé, et disposons concentriquement à cet inducteur un induit de dynamo à courant continu B muni de son commutateur à lames.

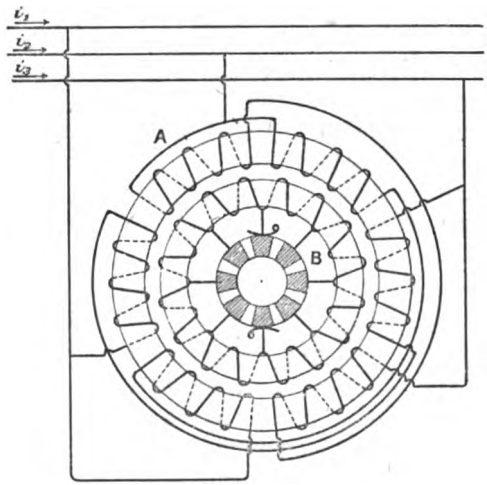
Le champ tournant produit par le courant polyphasé engendrera dans les spires de l'anneau fixe B des forces électromotrices égales à celles qui prendraient naissance si, ce même champ étant fixe, l'anneau B tournait en sens contraire, avec une vitesse égale à celle du champ tournant. Si donc on dispose deux balais frottant sur le collecteur suivant la ligne neutre, c'est-à-dire aux extrémités d'un diamètre à peu près perpendiculaire à la direction du champ à un instant

Digitized by Google

quelconque, on recueillera à ces balais un courant continu.

Puisque le champ et, par conséquent, la ligne neutre se déplacent, les balais devront suivre le champ tournant dans son mouvement. A cet effet, il suffira de monter ces balais sur un balancier entraîné par un petit moteur synchrone. Ce dernier pourra être constitué simplement par un barreau de fer, nu ou muni d'un enroulement recevant une dérivation du courant continu, mobile à l'intérieur d'un petit anneau analogue à l'inducteur du transformateur et alimenté par

Fig. 162.



une dérivation du courant polyphasé (ou en série avec cet inducteur). Pour faire varier le calage des balais suivant l'intensité du courant induit, il suffit de monter l'inducteur du moteur synchrone de façon qu'on puisse le faire tourner d'un certain angle.

Les balais du collecteur étant mobiles, ils devront être connectés à deux bagues calées sur l'axe du balancier, sur lesquelles le courant sera recueilli au moyen de deux frotteurs fixes.

Pour réduire la réluctance du circuit magnétique, les enroulements inducteur et induit sont logés dans des cannelures.

Digitized by Google

Le défaut de ce dispositif, proposé par l'auteur en 1893, réside évidemment dans la mobilité des balais du collecteur.

L'alterno-redresseur de MM. Rougé et Faget offre, au point de vue de la construction, une grande analogie avec le transformateur que nous venons de décrire; mais, son rôle étant de redresser un courant alternatif simple, il n'a pas pour principe l'action d'un champ tournant. L'induit est enroulé en tambour. Le moteur synchrone pour l'entraînement des balais ne possède pas d'inducteur spécial. Son armature, logée à l'intérieur de l'induit, est formée d'un cylindre d'acier creux, denté, portant un enroulement en fil fin parcouru par un courant dérivé des balais tournants. Cette armature est entraînée par une dérivation du flux résultant des ampères-tours primaires et des ampères-tours secondaires. Le calage des balais se trouve donc ajusté automatiquement.

Les génératrices Thomson-Houston, à fréquence réduite, sont un exemple de machines à balais tournants. Une dynamo à courant continu, à deux pôles, possède, outre les balais fixes recueillant le courant continu, une seconde paire de balais dont le balancier est animé d'un mouvement de rotation à l'aide d'un train d'engrenages commandés par l'arbre de la machine. Le mouvement des balais ayant lieu dans le sens de rotation de l'induit, on recueille à ces balais des courants de très faible fréquence, 380 à 400 périodes par minute [1].

II. — *Transformateur Hutin et Leblanc.*

Le principe de cet appareil est le suivant :

Considérons un transformateur dont l'enroulement primaire reçoit un courant alternatif de tension sinusoïdale. Si nous faisons varier le nombre de spires secondaires en série de telle façon qu'à chaque instant le produit de ce nombre de spires par la dérivée du flux magnétique dans le noyau par rapport au temps soit égal à un nombre constant, c'est-

[1] Voyez l'*Industrie électrique* du 25 mai 1894.

Digitized by Google

à-dire si nous faisons varier le nombre de spires secondaires en série en raison inverse de la variation instantanée du flux magnétique, nous obtiendrons dans cet enroulement secondaire une force électromotrice constante capable par conséquent d'engendrer un courant continu.

Dans le cas d'un courant alternatif simple ce résultat ne pourrait être obtenu que pendant une petite fraction de la période; aussi l'appareil de MM. Hutin et Leblanc ne s'applique-t-il qu'à la transformation d'un courant polyphasé en courant continu.

Ce dispositif comprend :

1° Un transformateur statique dont les enroulements primaires reçoivent le courant polyphasé, et dont les enroulements secondaires sont divisés en une série de bobines dont les nombres de spires sont différents;

2° Un commutateur à segments et à bagues calé sur l'arbre d'un petit moteur synchrone actionné par une dérivation du courant polyphasé. Ce petit moteur n'a qu'à vaincre les frottements des balais sur le commutateur, des tourillons et de l'air. Le commutateur effectue continuellement le groupement convenable des bobines secondaires de façon que la force électromotrice aux balais du commutateur soit sensiblement constante.

III. — *Redresseurs ou rectifieurs.*

Le rendement d'une lampe à arc à courant alternatif est inférieur à celui d'une lampe à arc à courant continu, et même à courant redressé, absorbant la même puissance. Il y a intérêt à ce que le charbon supérieur soit toujours positif, c'est-à-dire que le cratère soit en haut. D'autre part, si la fréquence est faible, par exemple 25 périodes par seconde, l'éclairage par arc exige soit le changement de la fréquence, soit la conversion, soit encore le redressement du courant alternatif ou polyphasé.

Un courant redressé étant ondulatoire influence les lignes téléphoniques, mais à un degré moindre que le courant alternatif.

Digitized by Google

Le redressement d'un courant alternatif est difficile pour une fréquence de 125 périodes par seconde; il est aisé à 60 périodes par seconde.

Un redresseur de courant alternatif se compose d'un commutateur à lames de cuivre séparées par d'épais segments isolants et reliées alternativement à deux bagues métalliques auxquelles deux balais amènent le courant à redresser. Une série de balais recueillent le courant redressé sur le commutateur. L'appareil est calé sur l'arbre d'un petit moteur synchrone actionné par le courant alternatif.

En général le courant à redresser est fourni par le secondaire d'un transformateur qui a les deux fonctions suivantes:

1° Donner au courant à redresser la tension voulue;

2° Rendre ce courant sensiblement constant quel que soit le nombre de lampes en série, avec un écart de 15 pour 100, par exemple, entre le courant absorbé par la totalité des arcs en série et le courant de court-circuit.

Pour obtenir ce second résultat, on donne au transformateur une grande dispersion magnétique. La meilleure disposition consiste à monter les enroulements primaire et secondaire côte à côte, la bobine primaire étant fixe, et la bobine secondaire, dont on équilibre partiellement le poids, pouvant se mouvoir le long du noyau magnétique en s'éloignant ou se rapprochant plus ou moins de la bobine primaire. Si, par suite de la mise en court-circuit d'une ou de plusieurs lampes, le courant secondaire augmente, cet accroissement de courant écarte la bobine secondaire de la bobine primaire, d'où résulte une augmentation de la dispersion magnétique, et par suite une réduction de la force électromotrice secondaire.

Pour redresser un courant diphasé il faut deux transformateurs à courant constant et un commutateur ressemblant à celui de la machine à arcs Brush. Dans le cas du courant triphasé, il faut trois transformateurs à courant constant et un commutateur analogue à celui de la machine à arcs Thomson-Houston. Un courant primaire polyphasé donne un courant redressé bien moins pulsatoire, plus uniforme que celui obtenu avec un courant primaire alternatif.

Le rendement d'un redresseur atteint aisément 90 pour 100.

Le transformateur à courant constant à été proposé par

Digitized by Google

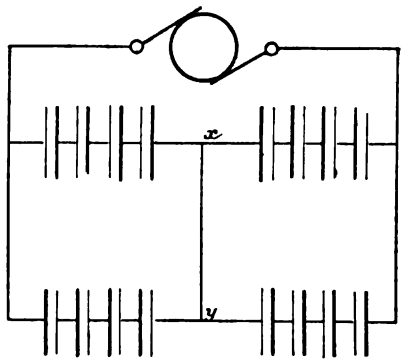
M. E. Thomson et par M. Z. de Ferranti. L'application du redresseur avec transformateur à courant constant à bobines secondaires équilibrées, pour éclairage par arcs en série, a été réalisée par M. Z. de Ferranti.

IV. — *Redresseur électrolytique.*

Buff indique, dans les *Liebig's Annalen* de 1857, qu'une pile de 9 éléments Bunsen est incapable de faire passer un courant à travers un élément ayant une anode d'aluminium.

D'après Graetz (*Wiedmann's Annalen*), un élément de pile

Fig. 163.



à anode d'aluminium peut équilibrer une force électromotrice de 22 volts.

Un élément formé d'une anode d'aluminium et d'une cathode de charbon dans un électrolyte composé d'eau saturée d'alun de potasse équilibre une force électromotrice de 22 volts.

On peut remplacer la cathode de charbon par une plaque de fer, ou encore par une cuve de fer formant récipient.

Un tel élément ne donne pas instantanément sa force contre-électromotrice normale, de telle sorte que cet appareil ne pourrait être utilisé pour redresser un courant alternatif que si la fréquence était extrêmement faible.

Graetz indique le schéma de la figure 163 pour redresser

Digitized by Google

un courant alternatif. Ce dispositif comprend quatre batteries composées chacune de quatre éléments formés d'une plaque mince d'aluminium et d'une plaque de charbon de 64^{cm^2} de surface, distantes de 4^{mm}, et plongeant dans de l'eau saturée d'alun. On recueille en xy un courant redressé. Ce courant, mesuré à l'aide d'un électrodynamomètre Siemens, était dans deux expériences de 3,96 et de 10,4 ampères, la fréquence du courant alternatif étant 73,3 et 74 périodes par seconde.

En donnant des dimensions suffisantes aux éléments de polarisation, la perte intérieure peut être réduite à 4 ou 5 pour 100, et l'on peut recueillir sous forme de courant redressé une puissance égale à 95 ou 96 pour 100 de celle du courant alternatif.

L'élément Pollak aluminium-plomb dans une solution saturée de phosphate de potassium comme électrolyte équilibre jusqu'à 200 volts.

Digitized by Google

CHAPITRE VI.

MOTEURS A COURANT POLYPHASÉ OU A CHAMP TOURNANT.

§ I. — Moteurs synchrones et moteurs asynchrones.

Les moteurs à courant polyphasé, ou à champ tournant, se divisent en moteurs *synchrones* et en moteurs *asynchrones*.

Les moteurs se composent de deux parties : l'une fixe, l'autre mobile. L'un de ces organes porte un système d'enroulements qui reçoivent le courant polyphasé, et exerce un couple sur le second organe constitué, en général, par un noyau de fer muni d'enroulements.

Les bobines recevant le courant polyphasé engendrent un système de champs magnétiques variables. Soient A un point quelconque de la surface polaire de cet organe supposé fixe, et β la densité du flux dans l'entrefer au point A et à l'instant t. Le champ en ce point reprendra la même valeur β à des intervalles de temps égaux au temps périodique T de chaque courant composant le courant polyphasé. Soit B un point du noyau magnétique mobile situé en regard de A à l'instant t. Si, en marche normale, la vitesse de rotation du moteur est telle que B passe devant A (ou inversement, si c'est l'organe recevant le courant polyphasé qui est mobile et le second organe qui est fixe) à des intervalles de temps égaux au temps périodique T, ou à un multiple de T si le moteur est à plusieurs ondes, on dit que le moteur est *synchrone*, ou qu'il tourne *synchroniquement* à la génératrice. Dans le cas contraire, il est dit *asynchrone*.

On appelle *onde magnétique* dans un moteur un faisceau de lignes de force de même sens engendrées par un enroulement, traversant l'entrefer et le noyau du second organe

Digitized by Google

pour se refermer par le premier organe en traversant une seconde fois l'entrefer. Une onde magnétique correspond donc à deux pôles.

§ II. — Moteurs synchrones.

I. — *Généralités.*

Dans les moteurs synchrones, la disposition relative de l'organe recevant le courant polyphasé qui produit le champ tournant et de l'organe fermant ce champ sur lui-même est telle que la vitesse relative de ces deux parties est égale à la vitesse du champ, c'est-à-dire que la vitesse du champ par rapport au second organe est nulle.

Ce résultat s'obtient en donnant au noyau de l'organe recevant le courant polyphasé une surface polaire sensiblement lisse, en munissant au contraire l'autre organe de parties saillantes, ou pôles, et en y adaptant un enroulement soit fermé sur lui-même, soit alimenté par un courant continu, de manière à obtenir à chaque saillie de cet organe, en marche normale, une polarité constante. Le champ engendré par le courant polyphasé tend à s'attacher à ces pôles.

Dans un moteur synchrone le courant de travail circulant dans une bobine change de sens lorsque celle-ci passe du champ d'un pôle dans le champ, de signe contraire, du pôle suivant. Pour que le couple produit par la réaction du courant de travail dans une bobine sur le champ soit de sens constant, il faut évidemment que le courant et le champ changent de signe simultanément. La polarité des pièces polaires de l'inducteur étant invariable, le moteur doit tourner synchroniquement au courant polyphasé.

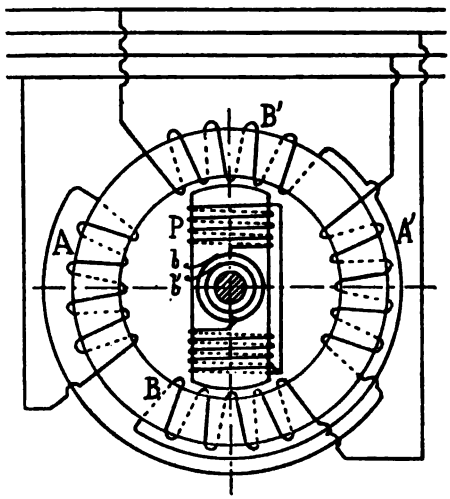
Les moteurs synchrones sont identiques à des génératrices de courant polyphasé.

La figure 164 est le schéma d'un moteur synchrone à courant diphasé. L'organe recevant le courant polyphasé est un anneau enroulé de quatre bobines occupant chacune le quart de la circonférence. Les bobines A, A′, diamétralement opposées, sont montées en série, ou en quantité, et reçoivent le cou-

Digitized by Google

rant $i_1 = I\sqrt{2}\sin 2\pi nt$; les bobines B, B′ sont montées de la même façon et reçoivent le courant $i_2 = I\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right)$. On obtient ainsi un champ magnétique dirigé suivant un

Fig. 164.



diamètre, et tournant en sens inverse des aiguilles d'une montre.

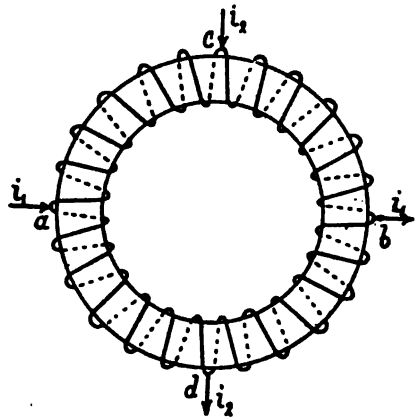
A l'intérieur de cet anneau est mobile un noyau de fer doux massif P muni d'un enroulement dont les extrémités sont fixées à deux bagues métalliques isolées sur lesquelles frottent deux balais *b*, *b′*.

Coupons le circuit de l'électro P, et lançons le courant diphasé. Le champ tournant, en vertu de l'hystérésis, tendra à entraîner la pièce P. Les pôles étant massifs le couple moteur se trouve renforcé par la réaction sur le champ des courants de Foucault qu'y développe le flux tournant. Si le couple résistant est suffisamment faible, le moteur s'accélérera et arrivera à tourner à la même vitesse que le champ, c'est-à-dire atteindra le synchronisme. On peut alors exciter l'élec-

Digitized by Google

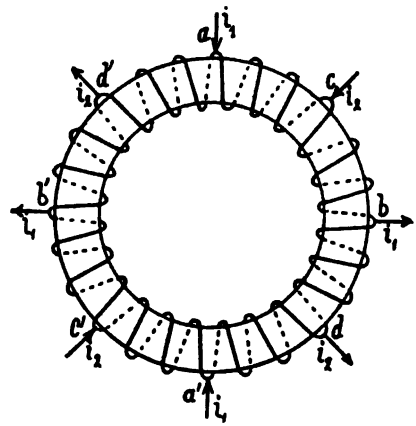
tro P, et le moteur devient capable de développer un couple plus grand.

Fig. 165.



L'enroulement de l'armature recevant le courant polyphasé peut être continu comme dans l'anneau Gramme. Dans le cas

Fig. 166.



d'un moteur à courant diphasé à une onde (*fig.* 165), l'un des courants, i_1, arrive à deux points a, b, diamétralement

Digitized by Google

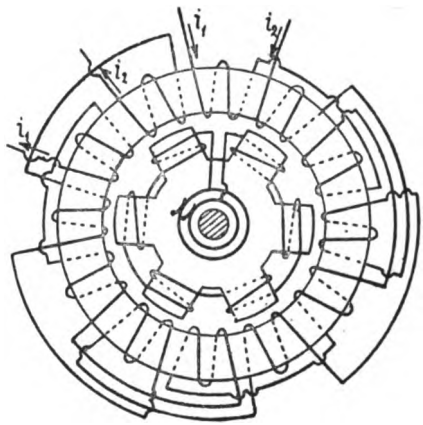
opposés, et le second courant, i_2, pénètre par les deux points *c*, *d*, situés aux extrémités d'un diamètre perpendiculaire au premier. Cette disposition exige évidemment quatre conducteurs pour l'amenée du courant diphasé au moteur, tandis que dans la figure 164 le nombre de conducteurs peut être réduit à trois.

La figure 166 représente l'armature en anneau, à enroulement continu, d'un moteur à courant diphasé à deux ondes. L'électro, ou inducteur, non représenté sur la figure, a quatre pôles.

L'enroulement continu adapté à l'armature mobile permet, dans certains cas, l'adjonction d'un commutateur à lames pouvant fournir le courant d'excitation de l'inducteur.

La figure 167 est le schéma d'un moteur à courant diphasé

Fig. 167.



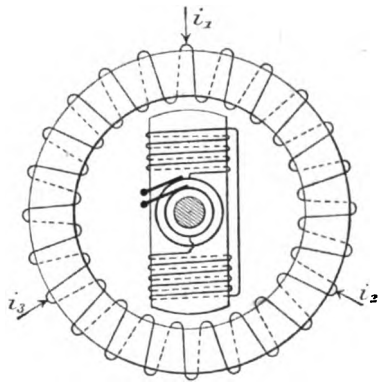
à trois ondes, avec armature en anneau muni de deux séries indépendantes de six bobines montées en tension. L'inducteur a six pôles.

La figure 168 représente un moteur à courant triphasé à une onde, avec armature en anneau à enroulement continu correspondant au montage en triangle. Le montage en étoile

Digitized by Google

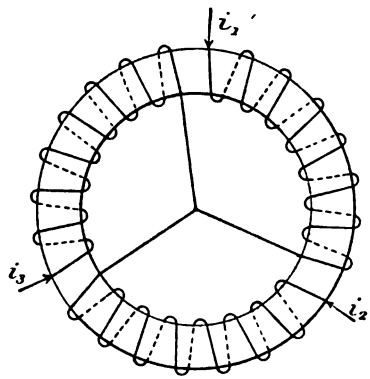
est indiqué sur la figure 169. En se reportant à l'étude des génératrices, on voit que le moteur serait plus puissant si

Fig. 168.



l'on remplaçait les trois bobines par six bobines, chaque paire de bobines diamétralement opposées formant une section.

Fig. 169.



Nombre de tours par minute. — Appelons n la fréquence, ou le nombre de périodes par seconde, de chaque courant composant. Un moteur à une onde (*fig.* 164) fera donc

Digitized by Google

n tours par seconde. Si, par exemple, $n = 50$, le moteur fera $50 \times 60 = 3000$ tours par minute.

Cette vitesse est exagérée dès qu'il ne s'agit plus de moteurs de très faible puissance. Il est aisé de construire le moteur de façon qu'il fasse $\frac{n \times 60}{K}$ tours par minute, K étant un nombre entier quelconque. En effet, enroulons sur l'inducteur annulaire 4K bobines occupant chacune $\left(\frac{1}{4K}\right)^{\text{ième}}$ de la circonférence. Les bobines impaires 1, 3, 5, ..., $(4K - 1)$ forment une série alimentée par le courant

$$i_1 = I\sqrt{2}\sin 2\pi nt;$$

les bobines paires 2, 4, ..., 4K reçoivent le courant

$$i_2 = I\sqrt{2}\sin\left(2\pi nt - \frac{\pi}{2}\right).$$

Les bobines de chaque série sont toutes enroulées dans le même sens, et montées en tension comme l'indique la figure 167, la fin de l'une étant reliée à la fin de la suivante de la même série. L'enroulement de l'anneau produira évidemment dans le noyau 2K pôles alternativement nord et sud. L'inducteur possède 2K saillies polaires munies d'enroulements. On voit que dans l'intervalle d'une période chaque pôle inducteur se déplace d'un arc correspondant à quatre bobines, c'est-à-dire de $\left(\frac{1}{K}\right)^{\text{ième}}$ de circonférence. Il en est de même de l'inducteur en marche normale, puisqu'il tourne synchroniquement aux champs engendrés par le courant polyphasé. La pièce mobile fera donc $\frac{n}{K}$ tours par seconde ou $\frac{n \times 60}{K}$ tours par minute.

Dans le cas de la figure 167 on a $K = 3$; pour $n = 50$ le moteur fera donc

$$\frac{50 \times 60}{3} = 1000 \text{ tours par minute.}$$

La fréquence n étant donnée, les moteurs synchrones ne

Digitized by Google

peuvent être établis que pour des nombres de tours par seconde égaux à n, $\frac{n}{2}$, $\frac{n}{3}$, etc., c'est-à-dire au quotient de la fréquence par un nombre entier.

Tous les types de génératrices à courant polyphasé que nous avons décrits peuvent être utilisés comme moteurs synchrones. En particulier, l'inducteur peut être excité par une bobine unique, et être à pôles alternés ou de même nom.

L'étude d'un moteur synchrone à courant polyphasé étant presque identique à celle d'une génératrice, nous renvoyons le lecteur, pour le calcul des moteurs synchrones, à l'étude des machines que nous avons exposée plus haut.

L'Exposition d'Électricité de Francfort, en 1891, renfermait des moteurs Schuckert synchrones, à courant diphasé, de 25 et de 50 chevaux. Ces moteurs sont constitués par des dynamos Schuckert ordinaires, à anneau plat, tournant entre deux couronnes d'électro-aimants disposés de part et d'autre de l'anneau, les pôles en regard étant de même nom, et les paires de pôles étant alternativement nord et sud. L'arbre de la machine se prolonge au delà de l'un des paliers, et porte quatre bagues métalliques isolées entre elles et reliées chacune à une série de points de l'enroulement. Sur chacune de ces bagues frotte un balai connecté à l'un des quatre fils d'amenée du courant diphasé.

L'un de ces moteurs a une puissance de 25 chevaux; l'inducteur porte quatre paires de pôles. L'anneau tournant est relié à un commutateur ordinaire à lames sur lequel est pris le courant d'excitation. Un autre moteur, de 50 chevaux, a six paires d'électros, et ne possède pas de commutateur à lames; l'excitation est produite par une petite dynamo spéciale. Ce moteur actionnait une pompe centrifuge.

II. — *Démarrage des moteurs synchrones.*

Nous avons déjà étudié dans le Chapitre précédent, à propos des convertisseurs, la mise en marche des moteurs

Digitized by Google

synchrones. Rappelons les trois méthodes principales de démarrage :

1° Si le moteur synchrone actionne une dynamo chargeant des accumulateurs ou fonctionnant en quantité avec d'autres machines à courant continu dont une au moins est toujours en service, on peut utiliser la dynamo comme moteur à courant continu, avec intercalation d'un rhéostat, pour amener le moteur à courant polyphasé au synchronisme. Le moteur étant excité fonctionne comme génératrice à vide, et l'on contrôle le synchronisme au moyen d'un synchronoscope monté entre deux des bagues du moteur et deux des barres du tableau recevant le courant polyphasé de la canalisation.

2° On peut amener le moteur au synchronisme au moyen d'un petit moteur d'induction qui n'a à vaincre que les frottements et les pertes par hystérésis et courants de Foucault du moteur excité, mais fonctionnant à vide. On constate le synchronisme comme dans la méthode précédente.

3° Le circuit d'excitation du moteur étant coupé, on lance le courant polyphasé sur le collecteur à bagues. L'hystérésis et les courants de Foucault engendrés par le flux tournant dans les pièces polaires réagissant sur le champ produisent un couple suffisant pour faire démarrer le moteur et l'amener au synchronisme. On limite le courant absorbé en intercalant pendant le démarrage, sur la canalisation amenant le courant polyphasé au moteur, un jeu de bobines de réaction ou un transformateur permettant d'abaisser momentanément la tension à la moitié ou au tiers de sa valeur normale.

Il est utile de disposer d'un moyen permettant de reconnaître aisément l'instant où le moteur a atteint le synchronisme. L'instrument employé à cet effet par la Société Schuckert est un voltmètre à courant alternatif, sans aimant permanent, du genre Hummel par exemple, que l'on relie aux extrémités de l'enroulement des électros. Tant que la rotation du moteur n'est pas synchrone, le flux émis par l'armature se ferme tantôt dans l'air, tantôt à travers le noyau de l'inducteur. Le flux qui traverse les noyaux des électros varie donc constamment, engendrant dans leur enroulement une force électromotrice alternative qui est indiquée par le voltmètre. Dès que le moteur est arrivé au synchronisme, les

Digitized by Google

pôles engendrés par l'armature se maintiennent constamment en regard des pièces polaires, et le flux qui traverse les noyaux ne varie plus sensiblement. Le voltmètre indiquera donc à la mise en marche une forte déviation qui diminuera peu à peu, et s'annulera lorsque le synchronisme sera atteint.

Le voltmètre peut être remplacé par une ou plusieurs lampes à incandescence. Ces lampes, très brillantes au début de la mise en marche, pâliront peu à peu en présentant des battements de lumière de plus en plus prolongés à mesure que le moteur s'accélérera, et s'étendront lorsque le synchronisme sera réalisé.

Lorsque le synchronisme est obtenu, on excite les électros. On voit à ce moment l'intensité du courant polyphasé baisser brusquement par suite de la réduction du retard de phase. On supprime alors les bobines de réaction et l'on charge le moteur. L'inducteur ne doit être excité que lorsque le moteur a atteint la marche synchrone. En effet, si l'on excitait avant d'avoir obtenu le synchronisme, le moteur s'arrêterait, car le couple entre l'inducteur et l'armature serait dirigé alternativement dans un sens et dans l'autre. Si l'on avait excité trop tôt, il suffirait de couper l'excitation, le moteur se remettrait en marche.

Le couple de démarrage étant faible, le moteur doit démarrer sans charge. Ce couple étant produit en partie par la réaction des champs tournants sur les courants de Foucault qu'ils engendrent dans les pièces polaires, celles-ci sont avantageusement constituées par des masses de fer non laminées ou de fonte.

Pendant le démarrage le champ est produit par une composante en retard du courant polyphasé. Un entrefer de faible longueur et des pièces polaires convenablement épanouies facilitent donc le démarrage en réduisant l'intensité du courant absorbé pendant cette opération. Cependant l'entrefer ne peut pas être réduit comme dans un convertisseur, car alors la réaction d'induit du moteur serait considérable et donnerait naissance, en charge, à une composante en retard du courant importante.

Le courant de démarrage est presque sans puissance.

Si l'on faisait fonctionner le moteur sans exciter l'inducteur

Digitized by Google

au moyen d'un courant continu, deux causes réduiraient la puissance de la machine :

1° Le courant polyphasé serait la résultante du courant de travail et du courant d'aimantation engendrant le champ magnétique et en retard d'un quart de période sur le premier. Or la perte en watts dans l'enroulement de l'armature est égale au produit de la résistance de cet enroulement par la somme des carrés du courant de travail et du courant d'aimantation. La perte supplémentaire due au courant d'aimantation entraîne donc la réduction du courant de travail, pour un même échauffement.

2° La dispersion magnétique serait importante. La réaction du courant polyphasé produirait une forte distorsion du champ qui accroîtrait le courant d'aimantation. La dispersion magnétique réduit elle-même le couple moteur.

On a trouvé qu'en excitant l'inducteur d'un moteur Schuckert synchrone par un courant continu, la puissance développée pouvait être de quatre à cinq fois plus grande que sans excitation.

Pour éviter la production de tensions dangereuses dans l'enroulement de l'inducteur pendant le démarrage, on découple les bobines pendant cette opération à l'aide d'un commutateur.

Un moteur synchrone à courant alternatif simple donne un couple variant deux fois par période entre zéro et le double du couple normal. Un tel moteur ne démarre pas automatiquement.

III. — *Excitation des moteurs synchrones.*

Si l'enroulement de l'armature est continu, et si la tension du courant polyphasé ne dépasse pas quelques centaines de volts, on peut munir le moteur d'un commutateur à lames sur lequel on prend le courant d'excitation de l'inducteur comme dans le cas d'un convertisseur.

En général, l'enroulement de l'armature n'est pas continu et se trouve divisé en un nombre de bobines trop petit pour permettre l'emploi d'un commutateur à courant continu; en outre, les moteurs synchrones fonctionnent la plupart du

Digitized by Google

temps sous une tension élevée. On produit alors l'excitation de l'inducteur au moyen d'une excitatrice calée sur un prolongement de l'arbre du moteur. Si le moteur actionnait une génératrice de courant continu, celle-ci fournirait le courant d'excitation. Dans le cas où plusieurs moteurs synchrones seraient installés dans la même station, on pourrait les exciter au moyen d'une dynamo indépendante commandée par un moteur synchrone ou asynchrone.

IV. — *Courants sans puissance. Réaction d'armature.*

Nous venons de voir que la mise en marche d'un moteur synchrone au moyen du courant polyphasé s'effectue en coupant l'excitation des électros, le moteur étant à vide ou à très faible charge. Dans ces conditions, lorsque le moteur a atteint sa vitesse normale, c'est-à-dire le synchronisme, et si le courant polyphasé est utilisé directement sous sa tension normale, c'est-à-dire sans interposition d'une bobine de self-induction ou d'un transformateur réducteur de mise en marche, le courant consommé par le moteur est considérable.

Admettons qu'on puisse faire varier entre des limites étendues le courant d'excitation des électros dont nous supposons les noyaux de section suffisante pour que leur saturation ne soit jamais excessive, et intercalons un ampèremètre dans l'un des conducteurs amenant le courant polyphasé. Le synchronisme étant atteint, et la tension du courant polyphasé étant maintenue constante, lançons le courant d'excitation et faisons croître celui-ci lentement. Nous voyons alors le courant polyphasé décroître progressivement jusqu'à ce que le courant d'excitation ait atteint une certaine intensité. Si nous continuons à accroître ce dernier, le courant polyphasé augmente de nouveau au fur et à mesure que l'excitation des électros croît.

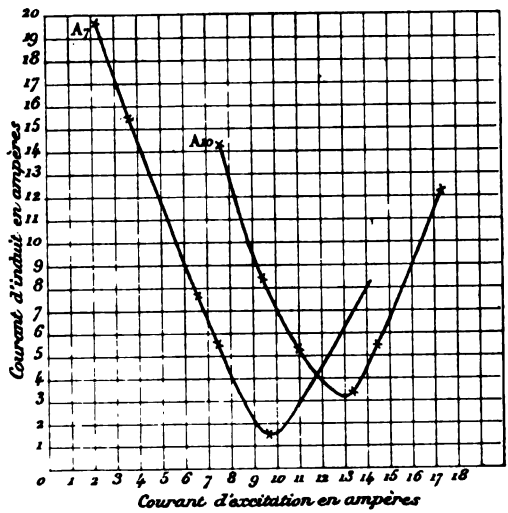
Les courbes de la figure 170 ont été publiées en 1893 par M. Mordey [1]. La courbe A_7 représente le courant à la ten-

[1] C.-L. Imhoff, *Phasenregulirung in Wechselstrombetrieben* (*Elektrotechnische Zeitschrift* du 20 septembre 1894).

Digitized by Google

sion de 2000 volts absorbé par une machine à courant alternatif de ce constructeur, de 25 kilowatts, utilisée comme moteur synchrone tournant sans charge, en fonction de l'excitation. La courbe A_{10} représente le courant absorbé par une machine à courant alternatif de 40 kilowatts, à 2000 volts, fonctionnant à vide, lorsqu'on fait varier l'excitation. On voit sur ces diagrammes que le courant minimum absorbé à vide par le moteur de 25 kilowatts est 1,5 ampère, corres-

Fig. 170.



pondant à une excitation d'environ 9,5 ampères, et que le courant minimum absorbé à vide par le moteur de 40 kilowatts est un peu supérieur à 3 ampères pour une excitation de 13 ampères.

Lorsque les moteurs fonctionnent en charge, on obtient des courbes en V analogues. Cette variation du courant alternatif ou polyphasé est due à l'excitation complémentaire produite par le courant dans l'induit. Le moteur étant synchrone, c'est-à-dire ayant une vitesse constante, tant que l'excitation des électros est insuffisante pour engendrer le champ nécessaire à la production de la force contre-électro-

Digitized by Google

motrice correspondant à la tension aux bornes, en tenant compte de la perte de tension dans l'enroulement et des fuites magnétiques, le courant absorbé par le moteur est la résultante du courant correspondant à la puissance effective du moteur et aux pertes intérieures, et d'une composante représentant le courant en retard d'un quart de période par rapport à la force électromotrice et fournissant le complément d'excitation pour la création du champ correspondant à cette force électromotrice.

Lorsque l'excitation des électros est suffisante, cette composante d'aimantation s'évanouit. Si alors on augmente le courant des électros, le moteur conservant sa vitesse normale, cette composante devient négative, de manière à réduire l'excitation totale du circuit magnétique et à ramener le champ à sa valeur normale. Cette composante est en avance d'environ un quart de période sur la tension aux bornes. Dans le cas précédent, le courant aux bornes du moteur est retardé; dans le second, ce courant a sa phase en avance sur celle de la tension; le moteur est dit *surexcité*.

Dans le premier cas, le moteur agit par rapport à l'installation comme une bobine de self-induction; surexcité, il se comporte comme un condensateur, ces deux appareils étant supposés montés en série avec des récepteurs absorbant une certaine puissance réelle.

En 1890 et 1891, M. Swinburne a employé des condensateurs et des récepteurs synchrones à courant alternatif surexcités pour compenser le retard de phase du courant produit par ses transformateurs *hedgehog* à noyau magnétique ouvert, dont le courant d'aimantation est assez considérable.

M. v. Dolivo-Dobrowolsky [1] a installé dans les ateliers d'Œrlikon un moteur synchrone surexcité, fonctionnant à vide, dans le but de compenser la composante en retard de 90° qui surchargeait les machines, les transformateurs et la ligne du transport d'énergie par courant triphasé de Bülach aux ateliers d'Œrlikon.

M. Lahmeyer est allé plus loin dans cette voie en utilisant

---

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 6 décembre 1894.

Digitized by Google

la composante du courant polyphasé en avance de 90° sur la tension, produite par des moteurs synchrones ou des transformateurs rotatifs de courant polyphasé en courant continu surexcités, non seulement pour compenser la composante en retard de 90° produite par les moteurs asynchrones et les transformateurs, ainsi que par l'inductance des lignes, mais encore pour réagir sur le champ des génératrices, de façon à obtenir, jusqu'à un certain point, un réglage automatique de la tension du courant polyphasé.

M. Lahmeyer fit une première application de ce système de réglage à un transport d'une puissance de 300 chevaux de Bözingen aux ateliers du chemin de fer du Jura-Simplon, à Biel. A l'usine réceptrice se trouvent deux transformateurs, dont l'un convertit le courant triphasé en courant continu, en fournissant une puissance de 60 chevaux; le second reçoit 150 chevaux électriques; il fournit 75 chevaux sous forme de courant continu et le complément comme puissance motrice sur son axe.

M. Lahmeyer a fait une seconde application de ce mode de réglage à la distribution d'énergie électrique de Bockenheim, mise en marche vers la fin de 1892.

Dans cette installation, l'énergie est distribuée pour la majeure partie directement sous forme de courant triphasé, à la tension de la ligne primaire, à des moteurs asynchrones dont la réaction tend à réduire considérablement le champ des génératrices. Celles-ci produisent une tension de 80 volts qui est élevée à 680 volts par des transformateurs à courant triphasé. Ces machines sont de même construction que celle de Lauffen, et par suite sont très sensibles au courant d'induit. L'installation comprenait encore trois transformateurs de courant triphasé en courant continu. On reconnut bientôt que la réaction du courant des moteurs asynchrones sur les génératrices était extraordinairement forte. En surexcitant les transformateurs de courant triphasé en courant continu, M. Lahmeyer arriva à annuler sensiblement la réaction sur les génératrices et à doubler, et au delà, la puissance utile de ces machines.

L'utilisation de ce mode de réglage par les moteurs synchrones exige évidemment que les génératrices possèdent

Digitized by Google

une grande réaction d'induit. C'est le cas des machines à inducteur tournant à pôles alternés excité par une bobine unique. L'espace disponible pour cette bobine étant très limité, l'excitation est faible; l'enroulement induit étant au contraire logé dans les cannelures du noyau extérieur peut être établi très largement, être très puissant par rapport à l'inducteur; en outre le dispersion est considérable; la machine est très sensible aux variations du courant induit, surtout au courant retardé.

Ce système de réglage de la tension des génératrices a donc l'avantage d'augmenter la puissance de ces machines, des transformateurs et des canalisations. Nous devons cependant faire observer qu'en surexcitant les moteurs synchrones et les transformateurs de courant polyphasé en courant continu, on accroît l'intensité du courant polyphasé que reçoivent ces appareils, et par suite la perte intérieure par effet Joule. D'autre part, l'enroulement des électros de ces machines doit être calculé plus largement que si ces moteurs ou transformateurs fonctionnaient avec une excitation juste nécessaire pour ne pas décaler le courant qu'ils reçoivent; il doit donc contenir plus de cuivre, et par suite le prix en est plus élevé.

Les moteurs synchrones sont capables de supporter une plus grande surcharge que les moteurs asynchrones. Un moteur synchrone de 75 kilowatts, à courant triphasé, a été calé à la charge de 140 kilowatts sous une tension égale à la moitié de la tension normale. En admettant que la charge limite d'un moteur synchrone est proportionnelle au carré de la tension à ses bornes, le moteur en question fonctionnant à sa tension de régime eût calé à une charge égale à environ sept fois et demie sa charge normale. Un moteur asynchrone établi de façon à pouvoir supporter une telle surcharge aurait des dimensions énormes; son rendement et son facteur de puissance à charge normale seraient faibles.

Pour certaines applications, la constance de la vitesse des moteurs synchrones, qui est indépendante de la charge, et la valeur élevée de leur facteur de puissance les font préférer, malgré leur infériorité au point de vue du démarrage, aux moteurs asynchrones.

Digitized by Google

§ III. — Moteurs a champ tournant asynchrones, ou moteurs d'induction.

I. — *Généralités.*

Les moteurs à champ tournant asynchrones sont formés, comme à l'ordinaire, d'un organe fixe et d'un organe mobile : l'un, constituant l'inducteur, porte un système d'enroulements qui reçoivent le courant polyphasé; l'autre est l'armature fermant les flux engendrés par l'inducteur, et est muni d'une série d'enroulements formant un ou plusieurs circuits fermés sur eux-mêmes, distincts ou reliés ensemble.

L'enroulement de l'inducteur engendre un système de champs magnétiques variables constituant autant de champs tournant autour de l'axe de l'inducteur et par rapport à cet organe.

Ces champs inducteurs engendrent dans les enroulements fermés de l'armature des courants qui, réagissant sur les champs magnétiques, donnent naissance à un couple qui tend à entraîner l'organe mobile.

La propriété qu'a l'inducteur de ces moteurs d'induire des courants dans les enroulements de l'armature les a fait dénommer *moteurs d'induction*. L'armature est donc un *induit*.

Mais ces courants induits ne prennent naissance, et par conséquent il n'existe de couple moteur, que si les champs tournants et l'armature ont une vitesse relative différente de zéro.

Un moteur asynchrone a une grande analogie avec un transformateur. Ainsi, en enroulant l'inducteur et l'induit pour courant triphasé, et en calant l'organe mobile, les extrémités des enroulements induits étant connectés à trois bagues ou à trois bornes, suivant que l'armature doit être mobile ou fixe en marche normale, on peut recueillir sur l'induit un courant triphasé dont la force électromotrice est dans un rapport constant avec la tension du courant primaire (en négligeant la dispersion magnétique). L'appareil constitue alors un véritable transformateur à courant triphasé. On peut

Digitized by Google

encore enrouler l'induit de façon à obtenir soit un courant diphasé, soit un courant alternatif. Le courant primaire peut aussi être diphasé, et le secondaire diphasé, triphasé ou alternatif.

On peut même utiliser l'appareil simultanément comme moteur et comme transformateur. Dans ce cas, la fréquence du courant secondaire serait inférieure à celle du courant primaire. Si l'on modifiait la résistance du circuit secondaire extérieur, la vitesse du moteur varierait en sens inverse, et la tension entre deux bagues dans le même sens que cette résistance. Si l'on modifiait le couple résistant, la tension entre deux bagues varierait en raison directe de ce couple. La vitesse du moteur varierait donc en sens inverse du couple moteur.

II. — *Étude du champ magnétique engendré par un anneau Gramme alimenté en deux points diamétralement opposés.*

Considérons un noyau de fer doux A muni d'un enroulement continu, du type Gramme, et disposons concentriquement à A un second anneau de fer doux B. Lançons dans l'enroulement de A un courant continu 2I entrant en X et sortant en X'. Nous aurons en quelque sorte deux électro-aimants demi-circulaires excités par un courant I et accolés par leurs pôles de même nom (*fig.* 171).

L'anneau A se trouve *shunté magnétiquement* sur sa surface intérieure par le noyau B. Nous nous proposons de déterminer la répartition du flux magnétique dans les noyaux et dans l'entrefer.

Soient :

l la longueur commune des noyaux suivant l'axe;

ρ le rayon extérieur du noyau intérieur B;

δ_1, δ_2 les épaisseurs radiales des noyaux;

a la longueur radiale de l'entrefer entre les deux noyaux;

z le nombre de spires excitatrices par centimètre de dévelop-

Digitized by Google

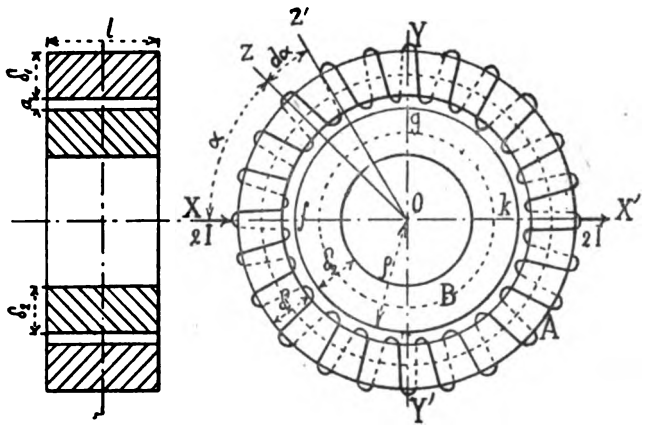
pement de la fibre moyenne de A, supposé constant en chaque point de cette fibre;

$\mathfrak{F} = 4\pi z I$ la force magnétisante de l'enroulement, par centimètre de développement de la fibre moyenne de A, I étant exprimé en C.G.S;

μ la perméabilité des noyaux A et B supposée constante et la même pour les deux noyaux;

u le potentiel magnétique dans une section méridienne

Fig. 171.



quelconque OZ du noyau A, supposé constant dans toute l'étendue de cette section;

u' le potentiel magnétique dans la section OZ de l'anneau B, supposé également constant dans toute la section;

Φ le flux magnétique dans l'anneau A, traversant normalement la section méridienne OZ, et compté positivement dans le sens XYX';

Φ' le flux dans la section OZ de l'anneau B;

β l'induction magnétique dans l'entrefer, dans le plan OZ, comptée positivement dans le sens ZO.

Digitized by Google

Nous admettrons que les dérivations magnétiques dans l'air, en dehors de l'entrefer, sont négligeables, c'est-à-dire que tout le flux magnétique émis par l'anneau A se ferme par l'entrefer et par le noyau B.

On a, d'après l'hypothèse précédente,

$$\Phi' = -\Phi. \tag{1}$$

On peut encore écrire

$$d\mathfrak{F} = 4\pi z \mathrm{I}\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\alpha, \tag{2}$$

$$du = \left(4\pi z \mathrm{I} - \frac{\Phi}{\mu l \delta_1}\right)\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\alpha, \tag{3}$$

$$du' = \frac{\Phi}{\mu l \delta_2}\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha. \tag{4}$$

Le flux magnétique dans l'entrefer compris entre les plans OZ et OZ′ est $\beta l \rho d\alpha$, et l'on a

$$\beta l \rho d\alpha = \frac{u - u'}{\frac{a}{l\rho d\alpha}}.$$

L'induction magnétique dans l'entrefer, dans le plan OZ, est donc

$$\beta = \frac{u - u'}{a}. \tag{5}$$

D'autre part, on a évidemment

$$\beta l \rho d\alpha = -d\Phi. \tag{6}$$

Différentions les relations (5) et (6); il vient

$$d\beta = \frac{du - du'}{a}, \tag{7}$$

$$l\rho d\beta d\alpha = -d^2\Phi, \tag{8}$$

d'où l'on tire

$$d\beta = -\frac{d^2\Phi}{l\rho d\alpha} = \frac{du - du'}{a} \tag{9}$$

Digitized by Google

et

$$(10)\qquad \frac{d^2\Phi}{d\alpha^2} = -\frac{l\rho}{a} \times \frac{du - du'}{d\alpha}.$$

Remplaçons dans (10) du et du' par leurs valeurs données par (3) et (4); il vient

$$(11)\qquad \left\{\begin{aligned} \frac{d^2\Phi}{d\alpha^2} &= \Phi\,\frac{\rho}{\mu a}\left(\frac{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}{\delta_1} + \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\delta_2}\right) \\ &\quad - \frac{l\rho 4\pi z I}{a}\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right). \end{aligned}\right.$$

Posons

$$(12)\qquad \frac{\rho}{\mu a}\left(\frac{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}{\delta_1} + \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\delta_2}\right) = m,$$

$$(13)\qquad \frac{l\rho 4\pi z I}{a}\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) = p.$$

La relation (11) devient

$$(14)\qquad \frac{d^2\Phi}{d\alpha^2} = m\Phi - p,$$

d'où l'on tire

$$(15)\qquad \alpha = \int \frac{d\Phi}{\sqrt{\int (2m\Phi\, d\Phi - 2p\, d\Phi) + C}} + C',$$

C et C′ étant des constantes d'intégration.

En posant

$$(16)\qquad \frac{p}{m} = q,$$

$$\frac{C}{m} = C_1,$$

$$C'\sqrt{m} = C'_1 = \operatorname{Log} C_2,$$

on a, en effectuant les intégrations,

$$(17)\qquad \Phi = q + \frac{1}{2C_2}\, e^{\sqrt{m}\alpha} + \frac{C_2}{2}(q^2 - C_1)\, e^{-\sqrt{m}\alpha}.$$

Digitized by Google

Posons encore

$$\frac{1}{2C_2} = K,$$

$$\frac{C_2}{2}(q^2 - C_1) = K'.$$

La relation (17) devient

$$(18) \qquad \Phi = q + K e^{\sqrt{m}\alpha} + K' e^{-\sqrt{m}\alpha}.$$

Les deux demi-anneaux A étant symétriques par rapport à l'axe XX', le flux magnétique change de signe en X et en X' quand on passe d'un demi-anneau à l'autre; il s'annule donc pour $\alpha = 0$ et pour $\alpha = \pi$. Les constantes K et K' sont donc déterminées par les relations

$$(19) \qquad 0 = q + K + K',$$

$$(20) \qquad 0 = q + K e^{\sqrt{m}\pi} + K e^{-\sqrt{m}\pi},$$

d'où l'on tire finalement

$$(21) \qquad \Phi = q\left[1 - \frac{e^{\sqrt{m}\pi} - 1}{e^{2\sqrt{m}\pi} - 1} e^{\sqrt{m}\alpha} - \frac{e^{\sqrt{m}\pi} - 1}{e^{2\sqrt{m}\pi} - 1} e^{\sqrt{m}(\pi-\alpha)}\right].$$

On a, en vertu des relations (6), (16) et (21),

$$(22) \qquad \beta l = -\frac{1}{\rho}\frac{d\Phi}{d\alpha} = \frac{p}{\sqrt{m}\rho}\frac{e^{\sqrt{m}\pi} - 1}{e^{2\sqrt{m}\pi} - 1}\left[e^{\sqrt{m}\alpha} - e^{\sqrt{m}(\pi-\alpha)}\right].$$

Cette dernière relation montre que β s'annule pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$. L'induction magnétique dans l'entrefer est donc nulle dans le plan OY.

Puisqu'on a

$$\frac{d\Phi}{d\alpha} = -\beta l \rho,$$

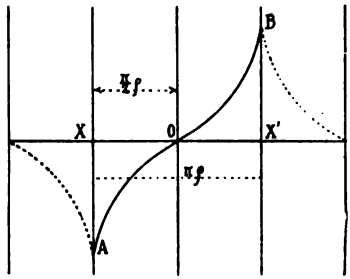
Φ est maximum pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$, autrement dit, le flux dans les noyaux est maximum dans la section OY, et égal, pour le noyau A, à

$$(23) \qquad \Phi \max = q\left(1 - 2\frac{e^{\sqrt{m}\pi} - 1}{e^{2\sqrt{m}\pi} - 1} e^{\sqrt{m}\frac{\pi}{2}}\right).$$

Digitized by Google

La relation (22) déterminant l'intensité du champ dans l'entrefer aux divers points de la demi-circonférence *fgk*,

Fig. 172.

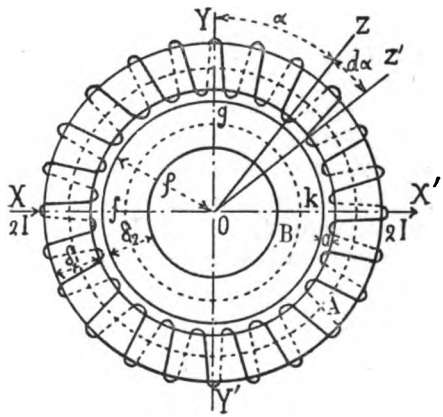


représente une courbe dont l'allure générale est celle de la ligne AOB de la figure 172.

Une telle répartition du flux magnétique ne donne pas un champ moyen élevé, dans l'entrefer, si l'on ne veut pas que l'intensité maximum de ce champ soit excessive, ce qui donnerait lieu à des fuites magnétiques importantes.

Cherchons maintenant quelle doit être la répartition de

Fig. 173.



l'excitation sur l'anneau A pour que l'induction magnétique dans l'entrefer varie comme les ordonnées d'une sinusoïde.

Digitized by Google

Soit β_m l'induction maximum dans l'entrefer. Comptons les angles à partir de OY, dans le sens YX'Y' (*fig.* 173). Nous avons par définition

$$(1) \qquad \beta = \beta_m \sin\alpha.$$

On a comme précédemment

$$(2) \qquad \beta\, l\rho\, d\alpha = -d\Phi,$$

d'où

$$(3) \qquad d\Phi = -\beta_m\, l\rho \sin\alpha\, d\alpha.$$

En intégrant les deux membres de cette équation, il vient

$$(4) \qquad \Phi = \beta_m\, l\rho \cos\alpha.$$

La constante d'intégration est nulle, car Φ est nul pour $\alpha = \frac{\pi}{2}$. On a en outre, comme plus haut,

$$\beta\, l\rho\, d\alpha = \frac{u - u'}{\frac{a}{l\rho\, d\alpha}}$$

ou

$$(5) \qquad u - u' = a\beta_m \sin\alpha,$$

$$(6) \qquad du = d\mathfrak{F} - \frac{\beta_m\, l\rho\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)\cos\alpha\, d\alpha}{\mu\, l\delta_1},$$

$$(7) \qquad du' = \frac{\beta_m\, l\rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\cos\alpha\, d\alpha}{\mu\, l\delta_2}.$$

Différentions la relation (5), et remplaçons du et du' par leurs valeurs données par (6) et (7); il vient

$$a\beta_m \cos\alpha\, d\alpha = du - du'$$

$$= d\mathfrak{F} - \frac{\beta_m \rho}{\mu}\left(\frac{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}{\delta_1} + \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\delta_2}\right)\cos\alpha\, d\alpha,$$

$$(8) \quad d\mathfrak{F} = a\beta_m \cos\alpha\, d\alpha + \frac{\beta_m \rho}{\mu}\left[\rho\left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2}\right) + \frac{a}{\delta_1}\right]\cos\alpha\, d\alpha.$$

Digitized by Google

En intégrant cette équation, on a

$$(9) \qquad \mathcal{F} = \beta_m \left\{ a + \frac{\rho}{\mu} \left[\rho \left(\frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} \right) + \frac{a}{\delta_1} \right] \right\} \sin \alpha.$$

On a, d'autre part,

$$(10) \qquad \mathcal{F} = 4\pi \int_{\alpha=0}^{\alpha=\alpha} z \mathrm{I} \left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2} \right) d\alpha.$$

C'est-à-dire que $\mathcal{F}$ désigne la force magnétomotrice produite par la partie d'enroulement comprise entre le plan OY et le plan méridien OZ correspondant à l'angle α. La relation (9) montre que *cette force magnétomotrice doit croître comme le sinus de l'angle* α. La relation (8) exprime que *la force magnétisante, ou excitation par centimètre de développement de l'anneau* A, *aux différents points de la circonférence, doit varier comme le cosinus de l'angle* α *définissant la position de ces points.*

Cette force magnétisante variable a pour expression $4\pi z \mathrm{I}$, z étant le nombre de spires par centimètre au point considéré, et I le courant, en unités C.G.S., qui parcourt ces spires. On peut donc obtenir cette force magnétisante variable aux divers points de l'anneau, de trois manières différentes :

1° En donnant à I une valeur constante, et en faisant varier z comme $\cos\alpha$;

2° En prenant z constant et en faisant varier I comme $\cos\alpha$;

3° En faisant varier z et I simultanément.

C'est la deuxième méthode que nous aurons à envisager dans l'étude des moteurs à champ tournant.

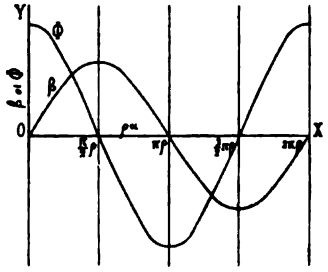
Dans la figure 174 on a porté en abscisses les longueurs développées des arcs $\rho\alpha$ de la circonférence extérieure de l'anneau B, et en ordonnées les valeurs de l'induction β dans l'entrefer et du flux total Φ dans le noyau A, dans un même plan méridien. Le flux dans l'anneau B serait représenté par la courbe symétrique par rapport à OX. Ces diagrammes sont des sinusoïdes.

Le flux total Φ est nul dans les sections OX et OX' (*fig.* 173); il est maximum dans le plan OY partageant l'enroulement excitateur en deux parties égales. L'induction β dans l'en-

Digitized by Google

trefer est en retard de 90° sur Φ. Elle présente un maximum négatif dans le plan OX; elle est nulle dans le plan OY, et a son maximum positif dans le plan OX′. La seconde moitié

Fig. 174.



du diagramme est donnée par la moitié Y′XY de l'anneau extérieur A.

Remarquons encore que Φ *varie comme* cosα, c'est-à-dire *comme la force magnétisante dans la même section.*

III. — *Étude d'un moteur asynchrone, ou d'induction, à une onde.*

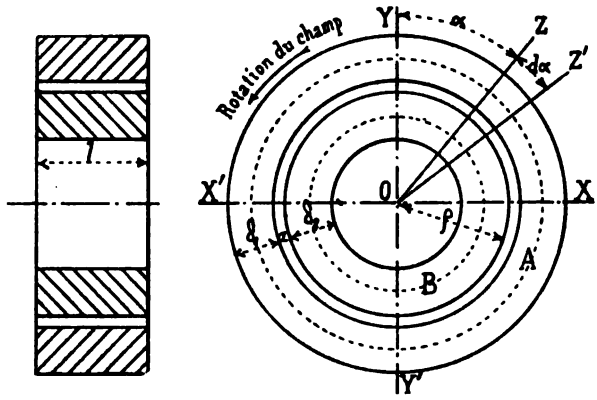
Supposons que l'anneau de tôle A (*fig.* 175) porte un enroulement formé d'une infinité de bobines ou spires infiniment minces, dont les extrémités sont soumises à des pulsations de tension e de même période T et de même maximum e_m, mais de phases différentes et telles que l'induction totale Φ_t dans la section du noyau par un plan méridien OZ quelconque soit proportionnelle au sinus de l'angle X′OZ augmenté de l'angle $\frac{2\pi t}{T} = 2\pi nt$, T étant la période d'une pulsation complète, et n le nombre de périodes par seconde. C'est-à-dire qu'une pulsation complète se propage sur la circonférence entière dans l'intervalle de temps T.

Appelons Φ_m le maximum du flux magnétique dans le noyau inducteur A, et β_m le maximum de l'induction β dans

Digitized by Google

l'entrefer, et prenons comme origine des angles le plan méridien OY. Les quantités Φ_t et β_t dans un plan méridien OZ quelconque, et à un instant t quelconque, sont donc définies,

Fig. 175.



par hypothèse, par les relations

$$(1) \qquad \Phi_t = \Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi n t\right),$$

$$(2) \qquad \beta_t = \beta_m \sin(\alpha + 2\pi n t).$$

Pour $t = 0$, on a

$$(3) \qquad \Phi = \Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) = \Phi_m \cos\alpha,$$

$$(4) \qquad \beta = \beta_m \sin\alpha.$$

Les relations (3) et (4) donnent les diagrammes Φ et β en lignes pleines de la figure 176 identiques à ceux de la figure 174. Les relations (1) et (2) donnent les diagrammes Φ_t et β_t en pointillé, qui ne sont autres que les précédents déplacés vers la gauche de la figure, d'une quantité $2\pi nt$. *Le champ dans l'entrefer tourne donc tout d'une pièce avec une vitesse angulaire constante* $2\pi n$, *en restant constamment identique à lui-même.* Dans le cas considéré, ce champ fait

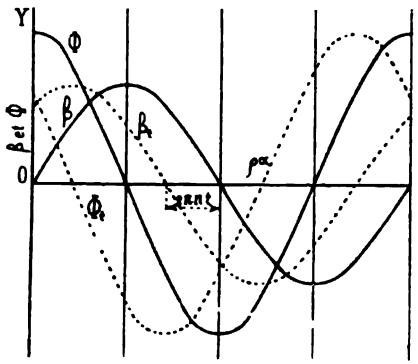
Digitized by Google

un tour par période, ou n tours par seconde, autour de l'axe du moteur.

On reconnaît aisément que les phénomènes qui se produisent sont identiques, à chaque instant, à la position près dans l'espace. Il nous suffira donc, pour étudier les phénomènes d'induction et calculer le couple moteur, de considérer le moteur *en allure normale,* à un instant quelconque, $t = 0$ par exemple, et de faire tourner le champ de l'entrefer avec une vitesse angulaire $2\pi n$.

Admettons comme précédemment que les fuites magné-

Fig. 176.



tiques dans l'air sont négligeables, et que l'induction magnétique dans le fer est proportionnelle à la force magnétomotrice, ce qui revient à considérer la perméabilité des noyaux comme constante, et à négliger l'hystérésis et les courants de Foucault.

Imaginons le noyau B entouré, sur toute sa périphérie, d'une infinité de spires métalliques jointives, infiniment minces et fermées sur elles-mêmes, formant, pour ainsi dire, une gaine uniforme, mais dans laquelle les courants induits ne peuvent circuler, sur le limbe de B, que suivant des génératrices de ce cylindre.

On a donc, à l'instant $t = 0$, comme nous l'avons vu,

$$(5) \qquad \beta l \rho = -\frac{d\Phi}{d\alpha}.$$

Digitized by Google

On voit aisément que l'accroissement $\frac{d\Phi'}{d\alpha}\,d\alpha$ du flux dans le noyau B est égal et de signe contraire à $\frac{d\Phi}{d\alpha}\,d\alpha$;

$$\frac{d\Phi'}{d\alpha}\,d\alpha = -\frac{d\Phi}{d\alpha}\,d\alpha. \tag{6}$$

Il en résulte que l'on a

$$\Phi' = -\Phi. \tag{7}$$

Conservons les mêmes notations que précédemment, et appelons :

r_1 la résistance de l'enroulement de A par centimètre de largeur compté sur la circonférence moyenne de A;

r_2 la résistance de l'enroulement induit par centimètre de largeur compté sur la circonférence moyenne de B;

i_1 le courant dans A, par centimètre de largeur compté sur la circonférence moyenne de A;

i_2 le courant induit dans l'enroulement de B, par centimètre de largeur compté sur la circonférence moyenne de B;

n' le nombre de tours de B par seconde, en régime normal;

$\mathfrak{M}$ le couple moteur sur l'induit.

Comptons positivement les courants i_1 et i_2 lorsqu'ils circulent sur les limbes extérieurs des anneaux A et B d'avant en arrière.

On a évidemment

$$\frac{r_2}{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha}\, i_2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha = 2\pi\rho\, l(n - n')\beta_m \sin\alpha, \tag{8}$$

d'où

$$i_2 = \frac{2\pi\rho\, l(n - n')\beta_m \sin\alpha}{r_2}. \tag{9}$$

Digitized by Google

En outre, on a

$$(10)\quad du = -4\pi i_1\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha - \Phi\,\frac{\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha}{\mu l \delta_1},$$

$$(11)\quad du' = -4\pi i_2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha + \Phi\,\frac{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha}{\mu l \delta_2}.$$

Le flux magnétique dans l'entrefer, entre deux plans infiniment voisins, est

$$\beta l \rho\, d\alpha = \frac{u - u'}{\frac{a}{l\rho\, d\alpha}}$$

ou

$$(12)\qquad \beta = \frac{u - u'}{a}.$$

On en déduit

$$(13)\qquad \frac{d\beta}{d\alpha}\,d\alpha = \frac{du - du'}{a}.$$

On a d'autre part

$$(14)\quad \left\{\begin{aligned} \frac{d\mathfrak{M}}{d\alpha}\,d\alpha &= \rho\beta l i_2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha \\ &= \frac{2\pi l^2 \rho^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)(n - n')}{r_2}\,\beta^2\, d\alpha. \end{aligned}\right.$$

Le couple moteur $\mathfrak{M}$ a donc pour expression

$$(15)\quad \left\{\begin{aligned} \mathfrak{M} &= 4\int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} \frac{2\pi\rho^2 l^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)(n - n')}{r_2}\,\beta^2\, d\alpha \\ &= \frac{2\pi^2\rho^2 l^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)(n - n')\beta_m^2}{r_2}. \end{aligned}\right.$$

$\mathfrak{M}$ est le couple moteur sur l'induit; il est un peu supérieur au couple résistant appliqué à l'arbre, principalement par suite du frottement des tourillons. Du poids de l'organe

Digitized by Google

mobile, des dimensions de la poulie et des tourillons, on déduira le couple de frottement qui sera égal à une fraction K du couple appliqué à l'arbre; on aura, P étant la puissance effective du moteur,

$$(16) \qquad \mathfrak{M} = (1 + K)\frac{P}{2\pi n'}.$$

La quantité $(n - n')$ est le ralentissement ou le *glissement* du moteur pour le couple $\mathfrak{M}$; c'est *approximativement* la différence entre le nombre de tours par seconde du moteur à vide et celui à la charge correspondant au couple $\mathfrak{M}$; cela ne serait rigoureux que si les résistances passives de l'induit étaient nulles. Pratiquement, le nombre de tours par seconde à vide est un peu inférieur à n. En général, on s'impose que $n - n'$ soit un certain pour 100 de n, 4 pour 100 par exemple.

Si, en outre, on se donne l'induction magnétique maximum β_m dans l'entrefer, et si l'on a déterminé ρ par la vitesse tangentielle, et l par comparaison avec d'autres moteurs existants, par exemple, la relation (15) donne la résistance r_2 :

$$(17) \qquad r_2 = \frac{2\pi^2\rho^2 l^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)(n - n')\beta_m^2}{\mathfrak{M}},$$

relation dans laquelle tous les facteurs du second membre sont connus.

Le courant i_2 se trouve aussi complètement déterminé par l'équation (9). En combinant (9) et (17) il vient

$$(18) \qquad i_2 = \frac{\mathfrak{M}}{\pi\rho l\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\beta_m}\sin\alpha.$$

On a, en outre,

$$(19) \qquad \Phi = -\rho l\beta_m\int\sin\alpha\, d\alpha = \rho l\beta_m\cos\alpha.$$

Remplaçons dans (13) $\frac{d\beta}{d\alpha}$, du et du' par leurs valeurs tirées

Digitized by Google

de (4), (10) et (11); nous avons

$$(20)\quad \left\{\begin{aligned} a\beta_m \cos\alpha\, d\alpha = &-4\pi i_1\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha \\ &-\Phi\frac{\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha}{\mu l \delta_1} + 4\pi i_2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha \\ &-\Phi\frac{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha}{\mu l \delta_2}. \end{aligned}\right.$$

On tire de cette dernière relation, en tenant compte de (18) et (19),

$$(21)\quad \left\{\begin{aligned} i_1 = &-\left[\frac{a}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} + \frac{\rho}{4\pi\mu\delta_1} + \frac{\rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}{4\pi\mu\delta_2\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)}\right]\beta_m \cos\alpha \\ &+ \frac{1}{\pi\rho l\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)}\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\sin\alpha. \end{aligned}\right.$$

Posons

$$(22)\qquad \frac{1}{\pi\rho l\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} = \mathrm{A},$$

$$(23)\qquad \frac{a}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} + \frac{\rho}{4\pi\mu\delta_1} + \frac{\rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}{4\pi\mu\delta_2\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} = \mathrm{B}.$$

La relation (21) devient

$$(24)\qquad i_1 = \mathrm{A}\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\sin\alpha - \mathrm{B}\beta_m\cos\alpha.$$

Posons encore

$$(25)\qquad \frac{\mathrm{B}\beta_m}{\mathrm{A}\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}} = \operatorname{tang}\psi,$$

Digitized by Google

(24) devient alors

$$(26) \qquad i_1 = \sqrt{A^2 \frac{\mathfrak{M}^2}{\beta_m^2} + B^2 \beta_m^2} \sin(\alpha - \psi).$$

La relation (25) montre que l'angle ψ décroît de $\frac{\pi}{2}$ à o lorsque le couple moteur $\mathfrak{M}$ croît de o à ∞. De l'examen des équations (18) et (26) il résulte que, dans un méridien OZ quelconque, la phase du courant induit i_2 est en avance de ψ sur celle du courant inducteur i_1; cette avance serait égale à $\frac{\pi}{2}$ pour $\mathfrak{M} = o$ (nous avons déjà vu qu'en marche, par suite des résistances passives, $\mathfrak{M}$ ne peut jamais être nul); elle tendrait vers zéro lorsque $\mathfrak{M}$ tendrait vers ∞. Les phases des deux courants tendent donc à coïncider au fur et à mesure que la charge du moteur augmente.

Les courants i_1 et i_2 ont pour maximum

$$(27) \qquad J_1 = \sqrt{A^2 \frac{\mathfrak{M}^2}{\beta_m^2} + B^2 \beta_m^2},$$

$$(28) \qquad J_2 = \frac{\mathfrak{M}}{\pi l \rho \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) \beta_m}.$$

Le courant inducteur i_1 dans un plan méridien OZ quelconque, et à un instant t quelconque, a pour expression

$$(29) \qquad i_1 = J_1 \sin(\alpha - \psi + 2\pi n t).$$

La tension e aux extrémités de la spire considérée est, à l'instant t,

$$(30) \qquad e = r_1 i_1 - \frac{d\Phi_t}{dt}.$$

Or on a

$$(31) \quad \Phi_t = \Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi n t\right) = \rho l \beta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi n t\right).$$

Digitized by Google

Donc

$$(32)\quad \begin{cases} e = r_1 J_1 \sin(\alpha - \psi + 2\pi n t) \\ \qquad - \rho l 2\pi n \beta_m \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + 2\pi n t\right) \\ = r_1 J_1 \sin(\alpha - \psi + 2\pi n t) \\ \qquad + \rho l 2\pi n \beta_m \sin(\alpha + 2\pi n t). \end{cases}$$

En développant le second membre de cette équation, on a

$$(33)\quad \begin{cases} e = r_1 J_1 \sin(\alpha + 2\pi n t)\cos\psi - r_1 J_1 \cos(\alpha + 2\pi n t)\sin\psi \\ \qquad + \rho l 2\pi n \beta_m \sin(\alpha + 2\pi n t). \end{cases}$$

Remplaçons J_1, $\sin\psi$ et $\cos\psi$ par leurs valeurs, et posons

$$(34)\qquad \frac{r_1 B \beta_m}{r_1 A \frac{\mathfrak{M}}{\beta_m} + \rho l 2\pi n \beta_m} = \operatorname{tang}\chi.$$

Il vient

$$(35)\quad e = \sqrt{\left(2\pi n \rho l \beta_m + r_1 A \frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\right)^2 + (r_1 B \beta_m)^2}\sin(\alpha - \chi + 2\pi n t).$$

Le maximum absolu de e est

$$(36)\qquad e_m = \sqrt{\left(2\pi n \rho l \beta_m + r_1 A \frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\right)^2 + (r_1 B \beta_m)^2}.$$

La tension e aux bornes d'une spire inductrice quelconque doit donc varier sinusoïdalement avec la position de cette spire, à un instant donné, et avec le temps t pour une position donnée.

Remarque. — L'induction magnétique β_m est une quantité qui varie avec le couple $\mathfrak{M}$, par suite de la perte de tension dans l'enroulement inducteur. Si nous appelons $\mathfrak{B}$ la valeur de β_m correspondant à $\mathfrak{M} = 0$, on a

$$(36\ bis)\qquad e_m = \mathfrak{B}\sqrt{(2\pi n \rho l)^2 + (r_1 B)^2}.$$

Dans les moteurs d'une certaine puissance, bien étudiés, la perte de tension dans l'enroulement inducteur est faible; il en résulte que β_m diffère peu de $\mathfrak{B}$, entre la charge nulle et la pleine charge.

Digitized by Google

Les relations (25) et (34) montrent qu'on a

$$\chi < \psi,$$

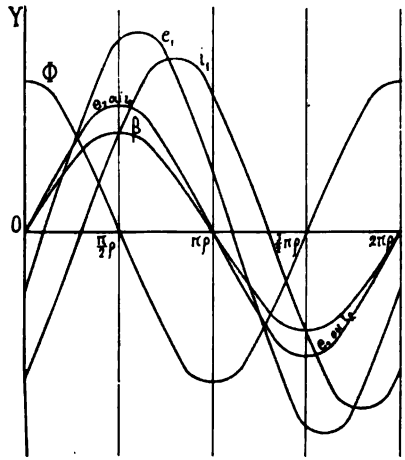
c'est-à-dire que la phase de la tension e aux bornes d'une spire inductrice quelconque est en avance sur celle du courant dans ladite spire d'un angle

$$\psi - \chi.$$

La phase du courant inducteur est donc en retard d'un angle $\psi - \chi$ sur celle de la tension. D'ailleurs cet écart diminue au fur et à mesure que le couple moteur $\mathfrak{M}$ augmente. En outre, si l'on prend r_1 très petit, $\mathfrak{M}$ correspondant à la charge normale du moteur, on peut rendre χ très petit.

La figure 177 représente les diverses quantités que nous

Fig. 177.



venons de considérer, dans leurs phases relatives. L'instant choisi est $t = 0$.

Le courant induit a pour expression

$$i_2 = \frac{\mathfrak{M}}{\pi l \rho \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) \beta_m} \sin(\alpha + 2\pi n t).$$

Digitized by Google

Pour une valeur très grande du couple moteur $\mathfrak{M}$, e_1, i_1 et i_2 ont sensiblement la même phase; pour $\mathfrak{M} = 0$, i_1 différerait en phase de 180° avec le flux Φ dans le noyau A.

La seconde des relations (32) exprime que *la tension e aux bornes d'une spire inductrice est, à chaque instant, égale à la somme de la perte instantanée de tension $r_1 i_1$ produite par le passage du courant dans cette spire et du nombre de lignes de force qui coupent par seconde le côté intérieur de cette spire.*

La perte de puissance due à la résistance de l'enroulement inducteur a pour expression

$$(37)\quad \left\{\begin{aligned} W_1 &= 4\int_{i_1=0}^{i_1=J_1} \frac{r_1}{\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\alpha}\left[i_1\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) d\alpha\right]^2 \\ &= \pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) r_1 J_1^2. \end{aligned}\right.$$

La perte de puissance dans l'enroulement induit est

$$(38)\quad \left\{\begin{aligned} W_2 &= 4\int_{i_2=0}^{i_2=J_2} \frac{r_2}{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha}\cdot\left[i_2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha\right]^2 \\ &= \pi\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) r_2 J_2^2 = \frac{r_2 \mathfrak{M}^2}{\pi l^2 \rho^2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) \beta_m^2} \\ &= 2\pi(n - n')\mathfrak{M}. \end{aligned}\right.$$

La perte de puissance dans l'enroulement induit est donc égale au produit du couple moteur par la perte de vitesse angulaire, résultat qui était à prévoir au point de vue mécanique.

Si β_m varie suffisamment peu avec la charge pour pouvoir être considéré comme pratiquement constant, la perte de puissance dans l'induit est proportionnelle au carré du couple moteur $\mathfrak{M}$.

Si les dimensions du noyau A sont données, on déduira

Digitized by Google

de β_m ou de Φ_m l'induction magnétique maximum $\frac{\Phi_m}{l\delta_1}$ dans le noyau inducteur; le volume du noyau et la fréquence du courant étant connus, on pourra calculer la perte de puissance W due à l'hystérésis et aux courants de Foucault. Les variations du flux dans le noyau de l'induit étant relativement lentes, on pourra négliger la perte correspondante.

Soient P la puissance effective du moteur, P′ la puissance à ses bornes, et F la puissance absorbée par les résistances passives. On a

$$(39)\quad \left\{\begin{aligned} P' &= 4\int_{i_1=0}^{i_1=J_1} e i_1\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha \\ &= \pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)e_m J_1 \cos(\psi - \chi). \end{aligned}\right.$$

Le rendement du moteur est

$$(40)\qquad \eta = \frac{P}{P'} = \frac{P}{P + F + W + W_1 + W_2}.$$

Remarque. — Toutes les quantités considérées dans cette étude sont exprimées en unités C. G. S.

De la relation (4), page 408,

$$\Phi = \beta_m l\rho \cos\alpha,$$

on déduit

$$(41)\qquad \Phi_m = l\rho\beta_m;$$

Φ_m est le *flux total* dans un demi-anneau; c'est le flux qui traverse la section OY.

Faisons dans l'équation (20) $i_2 = 0$, et désignons par i_0 la valeur correspondante du courant primaire; nous aurons

$$(42)\quad \left\{\begin{aligned} a\beta_m \cos\alpha\, d\alpha = &-4\pi i_0\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha \\ &- \Phi\frac{\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha}{\mu l\delta_1} - \Phi\frac{\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha}{\mu l\delta_2}, \end{aligned}\right.$$

Digitized by Google

ou, en vertu des relations (3) et (41),

$$(43)\quad \left\{\begin{aligned} &-4\pi i_0\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha \\ &=\Phi_m\left(\frac{a}{l\rho}+\frac{\rho+a+\frac{\delta_1}{2}}{\mu l\delta_1}+\frac{\rho-\frac{\delta_2}{2}}{\mu l\delta_2}\right)\cos\alpha\, d\alpha. \end{aligned}\right.$$

En intégrant les deux membres de cette équation entre $\alpha=-\frac{\pi}{2}$ et $\alpha=+\frac{\pi}{2}$, il vient

$$(44)\quad \left\{\begin{aligned} &\int_{\alpha=-\frac{\pi}{2}}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} -4\pi i_0\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha \\ &=\Phi_m\left[\frac{2a}{\rho l}+\frac{2\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)}{\mu l\delta_1}+\frac{2\left(\rho-\frac{\delta_2}{2}\right)}{\mu l\delta_2}\right]. \end{aligned}\right.$$

Le premier membre de cette équation représente la *force magnétomotrice totale* $\mathcal{F}_m$ *sur un demi-anneau inducteur.*

En faisant $t=0$ et $\psi=\frac{\pi}{2}$ dans l'équation (29), on a

$$(45)\qquad i_0=-J_0\cos\alpha.$$

Posons

$$(46)\qquad \frac{2a}{\rho l}+\frac{2\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)}{\mu l\delta_1}+\frac{2\left(\rho-\frac{\delta_2}{2}\right)}{\mu l\delta_2}=\mathcal{R}.$$

Il vient alors

$$(47)\quad \mathcal{F}_m=\Phi_m\mathcal{R}\qquad\text{ou}\qquad 4\pi J_0 2\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)=\Phi_m\mathcal{R},$$

relation dans laquelle $\mathcal{R}$ représente la *réluctance moyenne* du circuit magnétique formé par un demi-noyau inducteur, le demi-noyau induit correspondant et l'entrefer compris entre ces deux demi-noyaux.

La relation (24) montre que, lorsque le moteur développe un couple, le courant dans une spire inductrice est la résultante de deux courants dont le second est en retard d'un

Digitized by Google

quart de période sur le premier; ces courants ont respectivement pour valeur maximum $A\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}$ et $B\beta_m$. La phase du premier coïncide avec celle du courant induit i_2.

Le couple de réaction exercé par l'induit sur l'inducteur est la somme des couples correspondant à ces deux courants.

Le couple relatif au premier courant est égal à

$$(48)\quad \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} -A\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\sin\alpha\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha\, l\beta_m\sin\alpha\,\frac{\rho}{\rho+a}(\rho+a)=-\mathfrak{M}.$$

Le couple de réaction de l'induit sur ce courant est donc précisément égal et de signe contraire au couple exercé par l'inducteur sur l'induit.

Le couple de réaction de l'armature sur le second courant est

$$(49)\quad \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} B\beta_m\cos\alpha\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha\, l\beta_m\sin\alpha\,\frac{\rho}{\rho+a}(\rho+a)=0.$$

On a

$$(50)\quad \left\{\begin{aligned}&\int_{\alpha=-\frac{\pi}{2}}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} 4\pi B\beta_m\cos\alpha\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha\\ &\quad=2.4\pi B\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)\beta_m.\end{aligned}\right.$$

On tire des relations (23) et (46),

$$(51)\quad B=\mathfrak{R}\,\frac{\rho l}{2.4\pi\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)}.$$

La force magnétisante entre deux plans méridiens OZ, OZ′ infiniment voisins quelconques due au courant de travail $A\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\sin\alpha$ et au courant secondaire i_2 est

$$\begin{aligned}&-4\pi A\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\sin\alpha\left(\rho+a+\frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha\\ &+4\pi\frac{\mathfrak{M}}{\pi\rho l\left(\rho-\frac{\delta_2}{2}\right)\beta_m}\sin\alpha\left(\rho-\frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha.\end{aligned}$$

Digitized by Google

En remplaçant dans cette expression A par sa valeur définie par la relation (22) on voit que cette force magnétomotrice est identiquement nulle.

Le champ du moteur est donc engendré uniquement par la composante du courant primaire ayant comme maximum $B\beta_m$.

Le premier membre de l'équation (50) représente donc la force magnétomotrice totale $\mathcal{F}_m$ sur chacun des deux circuits magnétiques du moteur, et l'on peut écrire, en tenant compte de la relation (41),

$$\mathcal{F}_m = \rho l \beta_m \mathcal{R} = \Phi_m \mathcal{R}$$

ou

$$4\pi J_0 2\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right) = \Phi_m \mathcal{R}.$$

La composante $-B\beta_m \cos\alpha = -J_0 \cos\alpha$ représente donc le courant d'excitation. Ce courant est proportionnel au flux total dans le noyau inducteur, ou encore à l'induction magnétique maximum dans l'entrefer, et à la réluctance totale du circuit magnétique.

Ce courant J_0 qui retarde la phase du courant J_1 et augmente sa valeur étant proportionnel à la réluctance $\mathcal{R}$, il y a intérêt à réduire autant que possible cette dernière quantité. Ce résultat s'obtient en logeant les enroulements inducteur et induit dans des cannelures, et en laissant un très faible jeu entre le noyau fixe et le noyau mobile.

IV. — *Étude d'un moteur asynchrone à plusieurs ondes.*

Le moteur théorique que nous venons d'étudier ferait un peu moins de n tours par seconde, n étant la fréquence d'une pulsation de tension. Si l'on veut réduire la vitesse à une valeur $\frac{n'}{p} = N$ voisine de $\frac{n}{p}$, p étant un nombre entier, on construira le moteur de façon qu'il se produise $2p$ pôles inducteurs; de la sorte, l'un quelconque des champs tournants comprenant deux pôles, ou chaque onde magnétique dans l'entrefer, décrira par période un angle $\frac{2\pi}{p}$, c'est-à-dire effectuera un tour complet dans l'intervalle de p périodes.

Digitized by Google

Dans ce cas, l'induction β dans l'entrefer, dans une section méridienne OZ quelconque, à l'instant t, a pour expression

$$(1) \qquad \beta = \beta_m \sin(p\alpha + 2\pi n t)$$

et le flux total Φ_t dans la section OZ du noyau A est

$$(2) \qquad \Phi_t = \Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + p\alpha + 2\pi n t\right).$$

Faisons, comme précédemment, $t = 0$. Le courant i_2 est alors

$$(3) \qquad i_2 = \frac{\beta l 2\pi\left(\frac{n}{p} - N\right)\rho}{r_2} = \frac{2\pi\left(\frac{n}{p} - N\right)\rho l \beta_m \sin p\alpha}{r_2}.$$

Le couple moteur $\mathfrak{M}$ *sur l'induit* a pour expression

$$(4) \qquad \left\{ \begin{aligned} \mathfrak{M} &= 4p \frac{l^2\rho^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) 2\pi\left(\frac{n}{p} - N\right)}{r_2} \int_{p\alpha=0}^{p\alpha=\frac{\pi}{2}} \beta^2 d\alpha \\ &= \frac{2\pi^2 l^2 \rho^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\left(\frac{n}{p} - N\right)}{r_2} \beta_m^2. \end{aligned} \right.$$

La résistance r_2 de l'enroulement induit, par centimètre de largeur, est donc déterminée par la formule

$$(5) \qquad r_2 = \frac{2\pi^2 l^2 \rho^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\left(\frac{n}{p} - N\right)\beta_m^2}{\mathfrak{M}}.$$

N étant le nombre de tours par seconde du moteur à charge normale, le glissement est

$$(6) \qquad G = \frac{n}{p} - N.$$

La puissance *sur l'induit* du moteur est

$$2\pi N \mathfrak{M}.$$

On déduit des relations (3) et (4)

$$(7) \qquad i_2 = \frac{\mathfrak{M}}{\pi l \rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)\beta_m} \sin p\alpha.$$

Digitized by Google

On a, comme précédemment,

$$(8)\qquad \beta l\rho = -\frac{d\Phi}{d\alpha} = -p\Phi_m \cos\left(\frac{\pi}{2} + p\alpha\right).$$

Or

$$(9)\qquad \beta = \beta_m \sin p\alpha.$$

Donc

$$(10)\qquad \Phi_m = \frac{\beta_m l\rho}{p}.$$

On a encore

$$(11)\qquad \frac{d\beta}{d\alpha}\,d\alpha = \frac{du - du'}{a}$$

ou

$$(12)\quad \left\{\begin{aligned} pa\beta_m \cos p\alpha\, d\alpha = &-4\pi i_1\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)d\alpha + 4\pi i_2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)d\alpha \\ &-\Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{2} + p\alpha\right)\left(\frac{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}{\mu l \delta_1} + \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\mu l \delta_2}\right)d\alpha. \end{aligned}\right.$$

Posons

$$(13)\qquad \frac{1}{\pi l\rho\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} = \mathrm{A},$$

$$(14)\quad \frac{pa}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)} + \frac{\rho}{4\pi\mu\delta_1 p} + \frac{\rho\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}{4\pi\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)\mu\delta_2 p} = \mathrm{B}.$$

On tire des relations (7), (12), (13) et (14)

$$(15)\qquad i_1 = \mathrm{A}\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\sin p\alpha - \mathrm{B}\beta_m \cos p\alpha.$$

En posant

$$(16)\qquad \frac{\mathrm{B}\beta_m}{\mathrm{A}\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}} = \tang\psi,$$

Digitized by Google

la relation (15) prend la forme

$$(17)\qquad i_1 = \sqrt{A^2 \frac{\mathfrak{M}^2}{\beta_m^2} + B^2 \beta_m^2} \sin(p\alpha - \psi).$$

Le courant inducteur i_1 et le courant induit i_2 ont donc pour valeurs maxima absolues

$$(18)\qquad J_1 = \sqrt{A^2 \frac{\mathfrak{M}^2}{\beta_m^2} + B^2 \beta_m^2}.$$

$$(19)\qquad J_2 = \frac{\mathfrak{M}}{\pi l \rho \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) \beta_m}.$$

Considérons maintenant le moteur à un instant t quelconque. La tension e aux bornes de la spire située dans le plan OZ a pour expression

$$(20)\qquad e = r_1 i_1 - \frac{d\Phi_t}{dt}.$$

Or on a

$$r_1 i_1 = r_1 J_1 \sin(p\alpha - \psi + 2\pi n t),$$

$$\frac{d\Phi_t}{dt} = \frac{l\rho\beta_m}{p} \cos\left(\frac{\pi}{2} + p\alpha + 2\pi n t\right) 2\pi n;$$

donc

$$(21)\qquad \left\{\begin{aligned} e &= r_1 J_1 \sin(p\alpha - \psi + 2\pi n t) \\ &\quad + \frac{\rho l \beta_m}{p} 2\pi n \sin(p\alpha + 2\pi n t) \\ &= \left(r_1 A \frac{\mathfrak{M}}{\beta_m} + \frac{l\rho 2\pi n \beta_m}{p}\right) \sin(p\alpha + 2\pi n t) \\ &\quad - r_1 B \beta_m \cos(p\alpha + 2\pi n t). \end{aligned}\right.$$

Posons

$$(22)\qquad \frac{r_1 B \beta_m}{r_1 A \frac{\mathfrak{M}}{\beta_m} + \frac{2\pi n \rho l \beta_m}{p}} = \operatorname{tang}\chi.$$

Il vient

$$(23)\quad e = \sqrt{\left(\frac{2\pi n \rho l \beta_m}{p} + r_1 A \frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\right)^2 + (r_1 B \beta_m)^2} \sin(p\alpha - \chi + 2\pi n t)$$

Digitized by Google

dont le maximum absolu est

$$(24) \qquad e_m = \sqrt{\left(\frac{2\pi n \rho l \beta_m}{p} + r_1 A \frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\right)^2 + (r_1 B \beta_m)^2};$$

e_m est le maximum de la différence de potentiel aux bornes d'une spire inductrice.

Le courant d'excitation maximum, par centimètre de développement de la fibre moyenne du noyau inducteur, est

$$(25) \qquad J_0 = B \beta_m.$$

En appelant $\mathfrak{B}$ l'induction maximum dans l'entrefer correspondant à $\mathfrak{M} = 0$, on a

$$(26) \qquad e_m = \mathfrak{B} \sqrt{\left(\frac{2\pi n \rho l}{p}\right)^2 + (r_1 B)^2}.$$

Application. — Nous avons mesuré le courant efficace absorbé par un petit moteur asynchrone Siemens et Halske, à courant triphasé, tournant à vide, sous différentes tensions.

Puissance du moteur, en chevaux	2,5
Tension normale aux bornes, en volts	120
Tours du champ par minute	1500
Fréquence, en périodes par seconde	50
Nombre d'ondes	2

Inducteur.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres	198
Longueur du noyau, en millimètres	100
Nombre de cannelures	24
Nombre de fils par cannelure	25
Montage des deux ondes	en série
Montage des trois sections	en étoile

Induit.

Diamètre extérieur du noyau, en millimètres	196
Nombre de cannelures	36
Nombre de fils par cannelure	12
Montage des deux ondes	en série
Montage des trois sections	en étoile

Digitized by Google

Longueur de l'entrefer, en millimètres.....	1
Induction efficace dans l'entrefer, en kilogauss.	2,4
Rendement du moteur à pleine charge, pour 100.	78
Glissement à pleine charge, pour 100.....	7

Essai du moteur tournant sans charge, à la fréquence de 50 périodes par seconde.

TENSION AUX BORNES en volts.	COURANT A UNE BORNE en ampères.
110	5,5
120	6,25
145	7,5
200	11,0

Ce Tableau montre que le courant absorbé par le moteur tournant sans charge, à la fréquence de 50 périodes par seconde, est sensiblement proportionnel à la tension aux bornes.

La formule 25 (p. 428), en exprimant le courant efficace en ampères, et en tenant compte de ce que l'ouverture des cannelures est égale à 25 pour 100 de la largeur des dents, donne :

Courant d'aimantation par fil pour l'entrefer, en ampères.	5,23
Courant d'aimantation par fil pour les noyaux, en ampères environ.....	0,30
Courant efficace total d'aimantation par fil, en ampères...	5,53

Le rendement du moteur étant 78 pour 100 et le ralentissement 7 pour 100, à pleine charge, on peut admettre que la puissance absorbée par le moteur tournant à vide est égale à 12 pour 100 de la puissance aux bornes à pleine charge; le courant correspondant, à une borne, est donc

$$\frac{\frac{736 \times 2,5}{0,78} \times 0,12}{120 \times 1,732} = \frac{284}{208} = 1,36 \text{ ampère.}$$

Digitized by Google

Le courant total à une borne du moteur tournant à vide est donc

$$\sqrt{\overline{5,53}^2 + \overline{1,36}} = 5,7 \text{ ampères,}$$

au lieu de 6,25 ampères mesurés directement pour la tension de 120 volts. Cette différence peut être attribuée, au moins en partie, à l'existence de cannelures non fermées sur les deux noyaux.

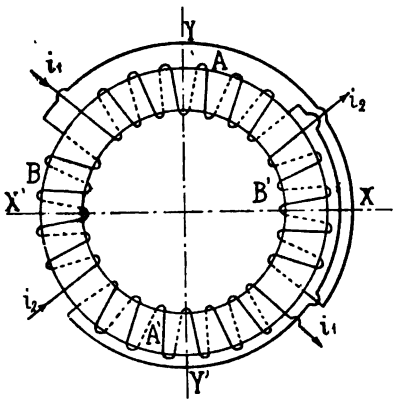
V. — *Considérations pratiques.*

Nous avons vu que, pour réduire le courant d'excitation et, par suite, le retard de phase du courant aux bornes du moteur, on loge les enroulements inducteur et induit dans des cannelures.

Les courants usités sont le courant diphasé et le courant triphasé.

Inducteur. — Considérons un moteur à une onde. Dans le cas du courant diphasé, l'enroulement inducteur sera con-

Fig. 178.

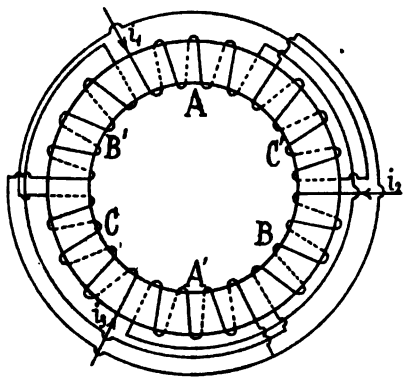


stitué par quatre bobines A, A', B, B' (*fig.* 178) montées deux à deux en série ou en quantité, et occupant chacune le quart

Digitized by Google

de la circonférence. Dans le cas du courant triphasé, l'enroulement inducteur comprendra six bobines A, A′, B, B′, C, C′ occupant chacune un sixième de circonférence (*fig.* 179).

Fig. 179.



Nous avons étudié jusqu'ici l'enroulement en anneau. Les considérations précédentes s'appliquent également à l'enroulement en tambour. Ce second type d'enroulement a même l'avantage de réduire les fuites magnétiques.

Le flux maximum dans l'inducteur étant déterminé, on calculera les pertes dans le noyau par courants de Foucault et par hystérésis d'après les formules que nous avons indiquées à propos des transformateurs.

Induit. — L'enroulement de l'induit est en anneau, en tambour ou en cage d'écureuil. Si l'enroulement est en anneau, il peut être constitué, comme celui de l'inducteur, par quatre ou par six bobines par onde. Dans le cas d'un moteur à courant triphasé, l'enroulement peut être monté en triangle ou en étoile.

Si la mise en marche doit être faite au moyen d'un rhéostat, les extrémités de l'enroulement sont reliées à trois bagues ou à trois bornes, suivant que l'induit est mobile ou fixe.

Dans le cas où la mise en marche doit s'effectuer sans

Digitized by Google

rhéostat, les extrémités de chaque section peuvent être soudées ensemble. Si l'enroulement est en anneau, on peut connecter ensemble les extrémités de chaque bobine logée dans une cannelure. Si l'enroulement est en tambour et formé d'une barre par cannelure, on peut relier en court-circuit toutes les barres situées dans des champs égaux en valeur absolue. Ainsi, dans le cas d'un moteur à deux ondes, on peut relier, au moyen de connexions en V, chaque groupe de quatre barres distantes de 90°. On obtient de la sorte une série de circuits fermés constitués chacun par quatre barres. L'enroulement induit en cage d'écureuil est formé de barres de cuivre logées chacune dans une cannelure et reliées sur chaque face du noyau par un anneau de cuivre. D'après l'étude précédente, le courant maximum parcourant ces anneaux est, pour un moteur à une onde, en unités C. G. S.,

$$C = \int_{\alpha=0}^{\alpha=\frac{\pi}{2}} i_2 \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) d\alpha = \left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) J_2 = \frac{\mathfrak{M}}{\pi \rho l \beta_m},$$

ou, si ρ, l, $\mathfrak{M}$, β_m sont exprimés respectivement en mètres, mètres-kilogrammes et kilogauss,

$$I_m = 10.9,81 \frac{\mathfrak{M}}{\pi \rho l \beta_m} \text{ ampères.}$$

Nombre de cannelures. — Si l'on donnait aux noyaux inducteur et induit le même nombre de cannelures, dans les positions particulières où les dents de l'un des noyaux se trouveraient exactement en regard des dents du second noyau il ne se produirait qu'un couple très faible dû aux fuites magnétiques au travers des cannelures. Les nombres de cannelures sur l'inducteur et sur l'induit doivent donc être différents, les cannelures de l'armature étant plus nombreuses que celles de l'inducteur.

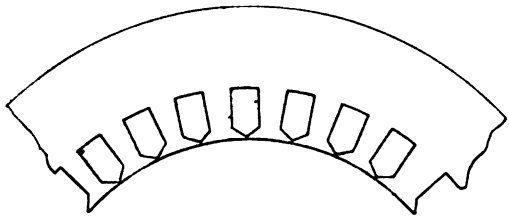
On adopte généralement pour l'inducteur 2 à 3 cannelures par pôle et par section, et même quelquefois 5 cannelures, et pour l'induit environ une fois et demie ces nombres.

Forme des cannelures. — La figure 180 représente une

Digitized by Google

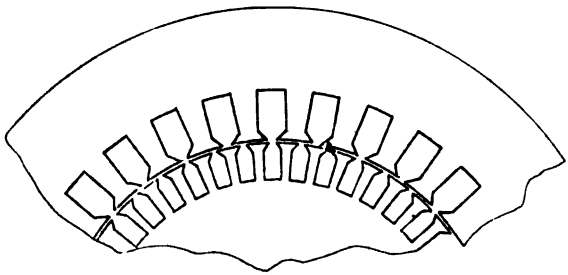
tôle de noyau inducteur à cannelures rectangulaires fermées.

Fig. 180.



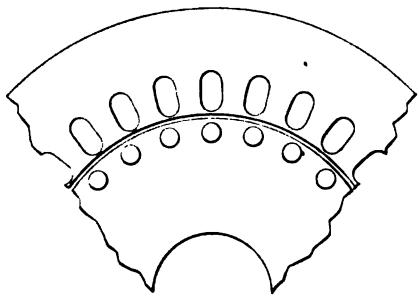
La figure 181 indique une tôle d'inducteur à cannelures rec-

Fig. 181.



tangulaires partiellement ouvertes, ainsi qu'une tôle d'armature à cannelures de même forme.

Fig. 182.

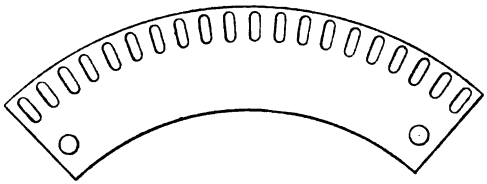


La figure 182 représente des tôles de noyaux inducteur et

Digitized by Google

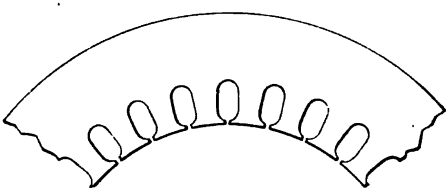
induit à cannelures fermées; les cannelures du noyau inducteur sont oblongues; celles du noyau induit sont rondes ou oblongues (*fig.* 183). La forme ronde convient spécialement

Fig. 183.



à l'enroulement en cage d'écureuil. Les cannelures oblongues peuvent être partiellement ouvertes (*fig.* 184).

Fig. 184.



Les cannelures fermées donnent un champ plus régulièrement réparti que celles ouvertes, mais elles augmentent la dispersion magnétique en fermant en court-circuit une partie du champ autour de l'enroulement de la cannelure correspondante. On réduit cette dispersion à une faible valeur en donnant au pont fermant la cannelure une très petite épaisseur, soit environ un demi-millimètre.

Il ne faut pas exagérer la largeur de l'ouverture des cannelures, car ces vides augmentent la réluctance de l'entrefer et, en outre, accroissent les pertes par hystérésis et courants de Foucault.

M. Görges a observé que les pertes dans le fer des noyaux d'un moteur d'induction sont parfois supérieures au double de celles qui se produisent dans le noyau d'un transformateur construit avec les mêmes tôles et fonctionnant à la

Digitized by Google

même induction et à la même fréquence. M. Görges attribue ce phénomène aux aimantations et désaimantations des dents des noyaux.

Supposons les cannelures complètement ouvertes. L'induit ayant plus de cannelures que l'inducteur, ses dents ne sont pas aussi larges que les cannelures de l'inducteur, et, quand elles passeront devant ces cannelures, elles se désaimanteront presque complètement, puis s'aimanteront de nouveau en regard des dents. Si l'inducteur a deux cannelures par pôle et par section, soit 12 cannelures par onde, et si la fréquence est 50 périodes par seconde, en négligeant les quelques pour cent de glissement chaque dent de l'induit sera aimantée et désaimantée $12 \times 50 = 600$ fois par seconde. Si l'inducteur a 24 cannelures par onde, le nombre de cycles magnétiques est d'environ 1200 par seconde; il en résulte une perte supplémentaire de puissance assez importante par hystérésis et courants de Foucault.

En pratique, les cannelures ne sont pas complètement ouvertes, mais cette perte supplémentaire existe toujours, même si les cannelures sont fermées, par suite des variations de l'induction.

Un effet analogue est produit dans les dents de l'inducteur par les dents et les cannelures du noyau induit, les variations de l'induction étant moins intenses mais s'effectuant avec une fréquence plus élevée, puisque les dents de l'armature sont plus nombreuses que celles de l'inducteur. Si l'induit porte 30 cannelures par onde, on a pour une fréquence de 50 périodes par seconde 1500 cycles magnétiques par seconde.

En regard d'une dent, le flux dans l'entrefer s'épanouit d'autant plus que celui-ci est plus grand. On réduit donc les pertes par aimantation ondulatoire des dents en donnant aux ouvertures des cannelures une largeur d'autant plus petite que l'entrefer est plus faible.

L'expérience a montré que les pertes dans les dents augmentent d'abord lentement, puis plus rapidement, au fur et à mesure qu'on ouvre davantage les cannelures.

Noyaux. — Le noyau de l'inducteur est formé de tôles dont l'épaisseur, pour une perte donnée par courants de Foucault,

Digitized by Google

dépend de l'induction et de la fréquence du courant polyphasé. Pour les fréquences de 50 à 60 périodes par seconde, on adopte en général des tôles de $0^{mm},33$ à $0^{mm},5$ d'épaisseur.

Le noyau induit est soumis à une fréquence très faible, soit environ 2 pour 100 de la fréquence du courant primaire pour les moteurs de 200 chevaux et au-dessus, et environ 8 pour 100 pour un moteur de 1 cheval. La perte de puissance par hystérésis et courants de Foucault dans le noyau de tôle est donc pratiquement négligeable. L'épaisseur des tôles n'a d'importance dans ce cas qu'au point de vue de la facilité du découpage et du serrage. Si l'on n'utilise pas pour le noyau induit les débouchures des tôles de l'inducteur, l'épaisseur de 1^{mm} convient bien.

L'induit en cage d'écureuil, établi en 1889 par M. Dolivo-Dobrowolsky, est de construction peu coûteuse; une armature donnée convient pour différents nombres d'ondes. L'expérience a montré que les moteurs munis de ce genre d'armature se comportent aussi bien que les moteurs à induit à enroulement proprement dit (en court-circuit) au point de vue du rendement, du facteur de puissance et du couple de démarrage.

Afin de réduire la réluctance de l'entrefer, on loge les barres de cuivre rondes ou méplates dans des trous très voisins de la surface extérieure du noyau. Il est plus économique de découper des tôles que de percer ces trous dans un noyau massif de grande longueur. On a enveloppé de papier ces barres de cuivre afin de les empêcher de vibrer pendant le démarrage.

Sur l'indication de M. Kittler, M. Dolivo a fait des essais avec un noyau induit massif. Il a construit deux armatures en cage d'écureuil, l'une avec noyau de tôle, l'autre avec noyau de fonte massif, pouvant tourner dans le même inducteur d'un moteur de 10 chevaux.

Le noyau massif est formé d'une poulie de fonte à jante épaisse dans le limbe de laquelle sont fraisées de nombreuses cannelures droites et de faible largeur recevant les barres de cuivre méplates disposées de champ et soudées à leurs extrémités à deux cercles de cuivre formant frettes. Ces barres de

Digitized by Google

champ, maintenues par les anneaux de cuivre extrêmes, résistent bien à la force centrifuge; les frettes proprement dites sont donc superflues.

Le rendement du moteur à noyau induit massif a été trouvé égal à 83 pour 100 au lieu de 82 pour 100 pour le moteur à noyau induit laminé. Le couple de démarrage, à tension égale, est le même pour les deux armatures, et supérieur au triple du couple normal. Le facteur de puissance à pleine charge est un peu plus élevé dans le cas de l'armature à noyau massif, et supérieur à 0,80.

Glissement de l'armature par rapport au champ. — Voici, à titre d'indication, quelques valeurs moyennes du glissement à pleine charge pour des moteurs d'induction à courant triphasé normaux, de différentes puissances, fonctionnant à une fréquence de 50 périodes par seconde.

PUISSANCE DU MOTEUR.	GLISSEMENT pour 100.
$\frac{1}{10}$ de cheval	12
$\frac{1}{3}$ de cheval	10
1 cheval	8
2 à 3 chevaux	7
5 chevaux	6
10 chevaux	5
20 chevaux	3 à 4
50 chevaux	2 à 3,5
100 chevaux	2 à 3
Au-dessus de 100 chevaux	1,5 à 3

Pour une puissance, une fréquence et une vitesse tangentielle données, la résistance de l'enroulement induit et, par suite, le glissement varient en sens inverse du nombre de tours par minute.

Au-dessus de 3 chevaux, les nombres du tableau ne s'appliquent qu'aux moteurs munis d'un dispositif de démarrage.

Digitized by Google

M. Georg Seibt a imaginé la méthode suivante pour la mesure du glissement d'un moteur asynchrone :

Montons entre deux des bagues de l'induit d'un moteur asynchrone à une onde, ou entre une bague et le centre de l'étoile mettant les balais en court-circuit, un ampèremètre marquant dans un seul sens, à fil à dilatation par exemple, et soit n la fréquence du courant primaire. Chaque fois que l'armature glissera d'un pôle, l'aiguille de l'ampèremètre passera d'une déviation minimum à une déviation maximum pour revenir à la déviation minimum. Pour un glissement de deux pôles, ou d'un tour complet, l'ampèremètre donnera donc deux battements.

Soit m le nombre d'oscillations complètes ou de battements observés pendant t secondes. Le glissement relatif est

$$(1) \qquad G = \frac{\left(\frac{m}{2t}\right)}{n} = \frac{m}{2tn}.$$

Si le moteur est à p ondes, le glissement relatif est

$$(2) \qquad G = \frac{\frac{\left(\frac{m}{2t}\right)}{p}}{\frac{n}{p}} = \frac{m}{2tn}.$$

L'œil peut compter 150 oscillations complètes par minute correspondant, pour $n = 50$, à un glissement de 2,5 pour 100.

Avec un voltmètre de précision marquant dans les deux sens, et monté entre deux points de l'un des câbles mettant l'armature en court-circuit, on peut mesurer un glissement double.

Rendement et facteur de puissance. — Le rendement des moteurs d'induction est aussi élevé que celui des meilleurs moteurs à courant continu.

Dans les débuts de la construction des moteurs asynchrones, on donnait à l'entrefer une longueur égale à environ $\frac{1}{200}$ du diamètre de l'armature. Le facteur de puis-

Digitized by Google

sance était alors compris, en général, entre 0,5 pour les moteurs d'une fraction de cheval et 0,8 pour les gros moteurs, la moyenne étant 0,7. Dans la construction actuelle, on adopte des dispositifs assurant le centrage parfait de l'armature; on donne à l'arbre un diamètre suffisant pour qu'on n'ait à craindre aucune flexion, et aux portées des dimensions assez grandes pour que l'usure des coussinets soit extrêmement faible. Ces perfectionnements dans la construction ont permis de réduire la longueur de l'entrefer à $\frac{1}{400}$ ou $\frac{1}{500}$ du diamètre de l'armature, tout en augmentant l'induction dans l'entrefer. On adopte même pour les moteurs de très grand diamètre un coefficient inférieur à $\frac{1}{500}$. On obtient de la sorte un facteur de puissance élevé qui, à partir des moteurs de 10 chevaux, peut atteindre 0,88 à 0,90.

Le Tableau ci-dessous indique quelques valeurs moyennes du rendement et du facteur de puissance pour des moteurs à courant triphasé normaux, à une fréquence de 50 périodes par seconde.

PUISSANCE du moteur en chevaux	RENDEMENT pour 100.	cos φ.
$\frac{1}{10}$	40	0,60
$\frac{1}{3}$	60	0,60
1	74	0,82
3	80	0,85
5	84	0,86
10	85	0,88 à 0,90
20	87	0,88 à 0,90
50	90	0,88 à 0,90
100 chevaux et au-dessus	90 à 92	0,88 à 0,92

Une grande vitesse périphérique du champ permet de réduire l'induction dans l'entrefer, et par suite d'accroître le facteur de puissance.

Digitized by Google

Les vitesses périphériques les plus usitées sont comprises entre 15^m et 30^m par seconde.

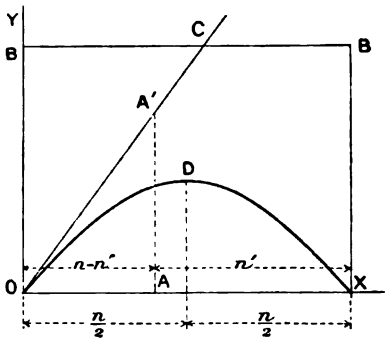
A la fréquence de 40 périodes par seconde, la puissance d'un moteur d'induction établi pour la fréquence de 50 périodes par seconde est réduite d'environ 7 à 8 pour 100.

VI. — *Valeur du couple moteur* $\mathfrak{M}$ *en fonction de la vitesse du moteur.*

Considérons un moteur asynchrone à une onde. Supposons d'abord les fuites magnétiques nulles, et la résistance de l'enroulement inducteur assez faible pour que la perte de tension dans cet enroulement puisse être négligée entre les limites considérées du couple.

L'induction magnétique maximum β_m pourra être considérée comme sensiblement constante entre ces limites, et représentée par l'horizontale BB (*fig.* 185). Le courant in-

Fig. 185.



duit maximum J_2 étant alors proportionnel à la vitesse relative $n - n'$ du champ et de l'armature sera représenté par une droite OC. Cette même droite représentera également, à un facteur près, le couple $\mathfrak{M}$. La puissance *sur l'induit* est donc proportionnelle au produit du courant J_2 par le nombre de tours n' par seconde du moteur. Elle est représentée par une parabole ODX à axe vertical. La puissance *sur l'induit*

Digitized by Google

serait donc maximum, dans l'hypothèse faite, pour $n' = \frac{n}{2}$.

Dans les moteurs d'une certaine puissance, bien établis, la chute de tension dans l'enroulement inducteur, à pleine charge, est faible, 3 pour 100 par exemple de la tension aux bornes; β_m varie donc très peu entre la charge nulle et la pleine charge.

Mais, si l'on veut étudier le fonctionnement du moteur lorsqu'on fait varier sa vitesse entre de grandes limites, si par exemple on considère le moteur démarrant sans rhéostat, on n'a plus le droit de négliger la perte de tension dans l'enroulement inducteur, car elle peut devenir considérable, et aussi par suite l'affaiblissement du champ inducteur. Le courant induit J_2 ainsi que le couple moteur $\mathfrak{M}$ ne peuvent donc plus être considérés comme proportionnels à la vitesse relative du champ et de l'induit.

Supposons encore les fuites magnétiques négligeables. Nous avons vu que le courant maximum J_1 dans l'inducteur est la résultante de deux courants à angle droit :

$$(1) \qquad J = A\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m} = \frac{1}{\pi\rho l\left(\rho + a + \frac{\delta_1}{2}\right)}\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m},$$

courant de travail, et

$$(2) \qquad J_0 = B\beta_m,$$

courant d'excitation, dont la phase est en retard d'un quart de période sur le premier.

Nous avons démontré d'autre part, dans l'étude des canalisations, que, dans les conditions de la pratique, la perte de tension dans un conducteur parcouru par un courant alternatif est, avec une grande approximation, égale au produit de la résistance de ce conducteur par le courant de travail.

On a

$$(3) \qquad J = J_2\frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}$$

et, en désignant par $\mathfrak{B}$ l'induction magnétique maximum

Digitized by Google

dans l'entrefer pour $\mathfrak{M} = 0$,

$$(4) \qquad e_m = \mathfrak{B}\sqrt{(2\pi n\rho l)^2 + (r_1 B)^2},$$

$r_1 B$ étant petit par rapport à $2\pi n\rho l$, et en quadrature avec cette dernière quantité, on peut écrire

$$(5) \qquad e_m = \mathfrak{B}\, 2\pi n\rho l.$$

La chute de tension dans une spire de l'enroulement inducteur, rapportée au courant maximum de travail J, est

$$(6) \qquad r_1 J = r_1 J_2 \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}.$$

La force électromotrice maximum dans une spire de l'inducteur est donc

$$(7) \qquad e'_m = e_m - r_1 J = 2\pi n\rho l\mathfrak{B} - r_1 J_2 \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}}.$$

En posant

$$(8) \qquad r_1 \frac{\rho - \frac{\delta_2}{2}}{\rho + a + \frac{\delta_1}{2}} \frac{1}{2\pi n\rho l\mathfrak{B}} = K,$$

il vient

$$(9) \qquad e'_m = 2\pi n\rho l\mathfrak{B}(1 - KJ_2)$$

et

$$(10) \qquad \beta_m = \mathfrak{B}(1 - KJ_2).$$

On déduit de cette équation et de la relation (28) page 417

$$(11) \qquad \mathfrak{M} = \pi\rho l\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) J_2 \beta_m = \pi\rho l\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right) J_2 (1 - KJ_2)\mathfrak{B}.$$

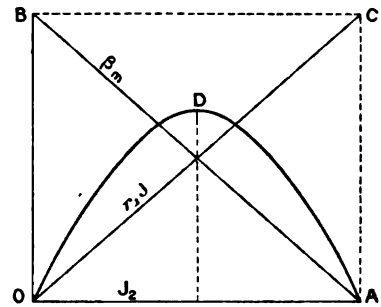
Dans la figure 186, nous avons porté en abscisse le courant induit J_2. L'ordonnée OB représente la tension e_m aux bornes et la densité de champ maximum $\mathfrak{B}$ à vide. Les valeurs

Digitized by Google

de la perte de tension, du champ $\beta_m = \mathfrak{W}(1 - KJ_2)$, et du couple $\mathfrak{M}$ sont portées en ordonnées. Le couple $\mathfrak{M}$ est représenté par la parabole ODA à axe vertical.

Rapportons maintenant ces diverses quantités à la vitesse

Fig. 186.

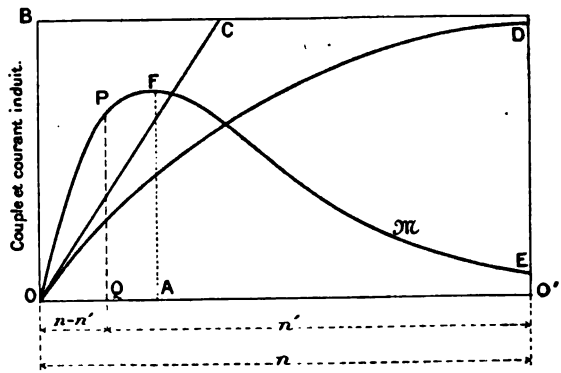


relative $n - n'$ du champ et de l'induit. On a

$$J_2 = \frac{2\pi\rho l}{r_2}\beta_m(n - n') = \frac{2\pi\rho l}{r_2}(1 - KJ_2)\mathfrak{W}(n - n').$$

Cette équation représente l'hyperbole OD ayant pour

Fig. 187.



asymptote BC (*fig.* 187), l'ordonnée OB étant égale à $\frac{1}{K}$. Le

Digitized by Google

courant J_2 tend donc vers un maximum $\frac{1}{K}$ lorsque $n - n'$ croît indéfiniment.

La tangente OC représenterait le courant induit dans le cas où l'induction maximum β_m serait constante et égale à $\mathfrak{B}$. KJ_2 tend vers l'unité lorsque $n - n'$ tend vers l'infini.

La courbe OFE représente le couple $\mathfrak{M}$. Ce couple croît d'abord avec la vitesse relative $n - n'$ jusqu'à un maximum AF, puis décroît indéfiniment en tendant vers zéro.

Cette étude montre la grande importance de la perte de tension dans l'enroulement inducteur *au point de vue du couple de démarrage.*

La dispersion magnétique joue un rôle important et en général nuisible dans les moteurs asynchrones. Elle dépend de plusieurs facteurs. Elle croît en particulier avec l'entrefer et avec le courant induit. Une fraction seulement du flux engendré dans l'inducteur pénètre dans l'armature. Il en résulte que, pour une vitesse relative donnée du champ inducteur et de l'armature, le courant induit se trouve diminué. Le couple moteur $\mathfrak{M}$ étant proportionnel au produit du courant induit par le champ pénétrant dans l'induit, ce couple se trouve réduit par la dispersion, à cause de la diminution de ses deux facteurs.

Dans les moteurs d'induction à courant polyphasé bien établis, le coefficient de dispersion magnétique, à pleine charge, est d'environ 10 à 15 pour 100.

Dans les conditions ordinaires de fonctionnement des moteurs asynchrones devant démarrer en charge, il est convenable d'établir ces moteurs de telle façon que le couple de démarrage soit au moins une fois et demie le couple normal. Le moteur démarrant, la vitesse croît jusqu'à ce que le couple sur l'induit soit égal à la somme du couple sur la poulie et du couple des résistances passives.

En tenant compte de la dispersion on obtient une courbe analogue à la courbe OFE de la figure 187, mais dont toutes les ordonnées sont inférieures. Les valeurs du glissement correspondant à une marche stable sont comprises entre zéro et OA, AF étant l'ordonnée maximum de la courbe OFE

Digitized by Google

VII. — *Réversibilité des moteurs d'induction.*

Considérons un moteur d'induction à une onde, dont la résistance de l'enroulement inducteur est faible, et supposons la dispersion magnétique négligeable entre les limites envisagées. Nous avons vu que, dans ces conditions, si l'on fait varier la charge du moteur entre zéro et la pleine charge, le champ dans l'entrefer peut être considéré comme pratiquement constant.

Nous avons trouvé pour le courant inducteur l'expression

$$(1) \qquad i_1 = A\frac{\mathfrak{M}}{\beta_m}\sin\alpha - B\beta_m\cos\alpha,$$

dont la valeur maximum est

$$(2) \qquad J_1 = \sqrt{A^2\frac{\mathfrak{M}^2}{\beta_m^2} + B^2\beta_m^2}.$$

Ce courant est la résultante du courant d'excitation

$$(3) \qquad J_0 = B\beta_m,$$

en retard d'un quart de période sur la tension, et du courant de travail

$$(4) \qquad J = \frac{A}{\beta_m}\mathfrak{M},$$

proportionnel à $\mathfrak{M}$, et coïncidant en phase avec la tension.

Si l'on fait varier le couple $\mathfrak{M}$ depuis sa valeur à pleine charge jusqu'à la charge nulle, le courant d'excitation J_0 restant constant, le courant de travail J diminue de sa valeur correspondant à la pleine charge jusqu'à zéro.

Remarquons que $\mathfrak{M}$ étant le couple *sur l'induit*, cette quantité n'est pas nulle même lorsque le moteur tourne à vide, puisqu'à ce moment $\mathfrak{M}$ est égal au couple des résistances passives. Lorsque la machine travaille comme *moteur*, le courant de travail ne peut donc pas s'annuler.

Si nous attaquons alors l'arbre du moteur asynchrone à courant polyphasé par un moteur spécial, nous pourrons

Digitized by Google

amener l'induit exactement au synchronisme. Le couple développé par le moteur auxiliaire sera alors égal au couple des résistances passives du moteur asynchrone, et le courant J sera réduit à zéro, le courant aux bornes du moteur étant J_0. A ce moment, le nombre de tours par seconde du moteur asynchrone à une onde sera donc égal à la fréquence n.

Nous avons vu que le couple $\mathfrak{M}$ sur l'induit a pour expression

$$(5) \qquad \mathfrak{M} = \frac{2\pi^2\rho^2 l^2\left(\rho - \frac{\delta_2}{2}\right)}{r_2}\beta_m^2(n - n').$$

Si nous augmentons alors le couple développé par le moteur auxiliaire, nous accroîtrons la vitesse du moteur à champ tournant, dont le nombre de tours par seconde n' deviendra supérieur à n. Le couple engendré par l'inducteur deviendra donc négatif. Par suite le courant de travail deviendra également négatif, c'est-à-dire que la machine *produira* un courant de travail J, *fonctionnera donc comme génératrice;* le courant de travail sera fourni par le moteur auxiliaire. La puissance électrique engendrée, proportionnelle au produit du courant de travail par la tension aux bornes, croîtra au fur et à mesure que la vitesse du moteur augmentera.

La fréquence du courant engendré est indépendante de la vitesse de l'induit; elle est égale à la fréquence de la tension du courant polyphasé amené aux bornes de la machine.

Une génératrice de courant polyphasé peut donc être constituée absolument comme un moteur asynchrone dont l'induit est muni d'enroulements fermés sur eux-mêmes et commandé par un moteur mécanique. L'organe formant l'inducteur du moteur et l'induit de la génératrice reçoit à ses bornes le courant polyphasé excitateur d'une machine jouant le rôle d'excitatrice.

Nous venons de voir que la fréquence du courant engendré par une génératrice de ce type est indépendante de la vitesse de l'organe en court-circuit actionné par le moteur mécanique. Partant de ce principe, la maison Siemens et Halske a proposé ce genre de génératrices dans le but d'obtenir un

Digitized by Google

accouplement facile de ces machines. Une série de génératrices ont leurs bornes reliées à celle d'une machine à courant triphasé ordinaire, et leur organe mobile muni d'enroulements en court-circuit est commandé par une machine motrice. L'accouplement de ces génératrices n'exige donc pas l'établissement du synchronisme; leur débit varie avec la vitesse relative des différents moteurs.

VIII. — *Démarrage des moteurs d'induction.*

On peut employer pour le démarrage des moteurs d'induction cinq méthodes principales :

1° La méthode la plus simple consiste à fermer directement le moteur sur la canalisation sans intercalation d'aucun appareil de mise en marche;

2° On peut interposer un rhéostat ou une bobine de self-induction sur l'inducteur du moteur;

3° L'induit peut être muni de bagues reliées à un rhéostat dont on fait varier la résistance d'un maximum à zéro;

4° L'enroulement induit peut être composé de plusieurs éléments que l'on relie successivement en quantité, de façon à diminuer progressivement la résistance des circuits induits au fur et à mesure que la vitesse du moteur augmente;

5° L'enroulement induit peut être constitué par plusieurs éléments, deux par exemple, composés de nombres différents de spires, que l'on relie en opposition au début de la mise en marche, puis en quantité lorsque le moteur a pris une certaine vitesse. Au début les forces électromotrices des deux enroulements se retranchent et, en outre, la résistance résultante de l'enroulement se trouve augmentée.

La première méthode est évidemment la plus simple, puisque la mise en marche s'effectue par la simple fermeture d'un interrupteur. D'après ce que nous avons vu, lorsque la vitesse du moteur est nulle, le couple de démarrage *sur l'induit* peut être inférieur au couple normal. En outre, le courant aux bornes de l'inducteur est, dans ces conditions, considérable. Ce procédé convient donc principalement aux moteurs qui n'ont pas à démarrer à pleine charge, et lorsque

Digitized by Google

la réaction du courant de démarrage sur les transformateurs, les canalisations et les génératrices ne présente pas grande importance. Un autre inconvénient de ce procédé est de produire un échauffement parfois considérable du moteur.

D'après les considérations que nous avons exposées plus haut, on accroîtrait le couple de démarrage du moteur, dans ces conditions, en adoptant un champ inducteur élevé, une faible résistance de l'enroulement inducteur et une résistance assez grande pour l'enroulement induit, et en établissant le moteur de manière que la dispersion magnétique soit faible. Mais alors le courant absorbé par le moteur à la mise en marche serait considérable. Pour les petits moteurs démarrant sans rhéostat, une assez forte dispersion réduit le courant de démarrage et peut par suite être utile; on peut alors adopter une armature à cannelures fermées ou à trous qui produisent la plus forte dispersion.

Dans l'application de ce mode de démarrage, les ateliers d'Œrlikon intercalent un manchon élastique entre l'arbre du moteur et l'arbre mené. On voit aisément que ce dispositif permet à l'induit de prendre une certaine vitesse avant d'entraîner l'appareil conduit, et par suite d'augmenter le couple à ce moment.

Ce procédé est très commode lorsqu'on a à commander à distance des appareils tels que des treuils, des ponts roulants, etc.

La seconde méthode, consistant à intercaler un rhéostat ou une bobine de self-induction sur l'inducteur, a pour but de réduire le courant absorbé à la mise en marche de manière à charger moins la canalisation, les transformateurs et les génératrices. L'intercalation de cet appareil a comme résultat de réduire le champ inducteur.

Ce procédé convient donc aux moteurs qui n'ont à démarrer qu'avec un faible couple.

Une variante de cette méthode consiste à employer un transformateur de mise en marche réduisant la tension à la moitié ou au tiers de la tension normale; cet appareil permet d'obtenir un courant de démarrage, aux bornes primaires du transformateur, plus faible qu'avec les deux appareils auxiliaires précédents.

Digitized by Google

La troisième méthode consiste à intercaler un rhéostat sur l'enroulement induit. A cet effet, les extrémités des sections de cet enroulement aboutissent à une série de bagues (lorsque l'induit est mobile) sur lesquelles frottent autant de balais reliés à un rhéostat dont on peut faire varier la résistance. On peut, à l'aide de cet appareil, amener le courant induit au démarrage à être égal ou supérieur au courant normal, tout en conservant au champ inducteur sa valeur. A mesure que la vitesse du moteur augmente, on réduit la résistance intercalée pour l'amener à zéro. Ce procédé convient lorsqu'on veut obtenir un grand couple de démarrage avec des moteurs n'exigeant pas un courant d'excitation très intense, et lorsque la mise en marche doit ne pas influencer beaucoup l'installation.

Les rhéostats employés sont soit métalliques, soit à liquide. Un rhéostat à liquide se compose de trois plaques métalliques montées sur le même support, que l'on fait plonger à volonté dans un bac contenant de l'eau rendue plus ou moins conductrice au moyen de sulfate de cuivre, de soude, etc. Les trois lames isolées entre elles sont reliées aux trois balais du moteur (l'induit étant supposé mobile). Le rhéostat peut même ne comporter que deux lames plongeant dans un vase métallique; dans ce cas le bac est relié à l'un des trois balais de l'induit.

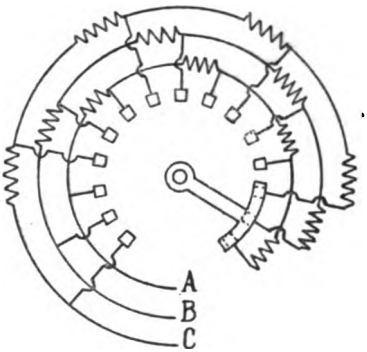
Si le rhéostat de démarrage est formé de résistances métalliques, et si l'on veut qu'il ne produise pas de variations brusques dans le couple moteur, et par suite dans l'intensité du courant aux bornes, le cadran doit comporter un grand nombre de touches. La maison Siemens et Halske a imaginé un dispositif qui simplifie le rhéostat de mise en marche.

Les trois balais de l'induit sont connectés aux trois bornes A, B, C du rhéostat (*fig.* 188) reliées aux extrémités de trois séries égales de résistances. Les résistances de la première série sont connectées aux plots 1-4-7, etc.; celles de la seconde série aux plots 2-5-8, etc.; celles de la troisième série aux plots 3-6-9, etc. La palette du rhéostat porte à son extrémité un épanouissement pouvant embrasser trois plots. On voit que pour la position de la palette indiquée sur la figure les trois groupes de résistances se trouvent inter-

Digitized by Google

calés en série avec l'induit. A mesure que l'on fait avancer la palette d'un plot, on met hors circuit une résistance de

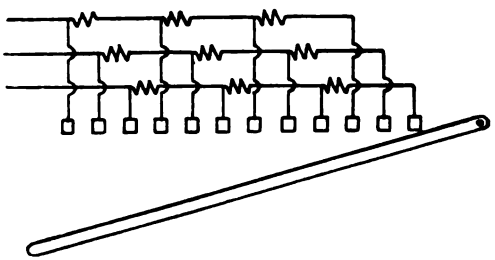
Fig. 188.



l'une des trois séries. Ce dispositif agit néanmoins sur les trois sections de l'induit à la fois.

Les plots du rhéostat peuvent être disposés en ligne droite (*fig.* 189). Ils sont en métal ou en charbon et sont

Fig. 189.



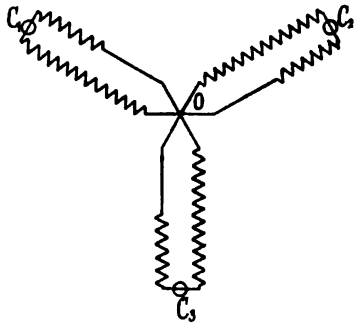
portés par des pièces élastiques. Un levier garni d'une lame de métal ou de charbon vient mettre successivement ces plots en court-circuit.

La cinquième méthode a été imaginée par la maison Siemens et Halske. Considérons un moteur à courant triphasé, par exemple, dont l'induit porte trois fils de même diamètre

Digitized by Google

par cannelure (*fig.* 190). Deux de ces fils font partie d'un enroulement ordinaire en étoile, le troisième formant un second enroulement également en étoile. Les six commencements de ces enroulements sont reliés deux à deux aux bornes C_1, C_2, C_3 et les six extrémités sont réunies ensemble au point O. On voit aisément que la somme arithmétique des ampères-tours dans chaque section est alors égale au tiers du nombre d'ampères-tours qui se produiraient si les trois bornes C_1, C_2, C_3 étaient réunies en court-circuit. Les ampères-tours

Fig. 190.



dans les deux séries d'enroulements étant opposés, le tiers seulement des ampères-tours totaux est utilisé pour la production du couple.

Appelons r la résistance d'une spire, et montons en quantité les deux enroulements d'une cannelure en reliant O et C_1 en court-circuit. Soit i le courant qui circulerait dans la spire unique pour une perte de tours donnée. Le courant dans l'enroulement à deux spires sera également i, et le nombre d'ampères-tours d'une cannelure sera

$$i + 2i = 3i.$$

Si, conservant la même perte de tours, nous montons les deux enroulements en opposition en coupant la connexion entre O et C_1, la force électromotrice résultante dans le circuit considéré sera égale à la moitié de celle engendrée par l'enroulement à deux spires et la résistance de ce circuit sera $3r$.

Digitized by Google

Le courant deviendra donc

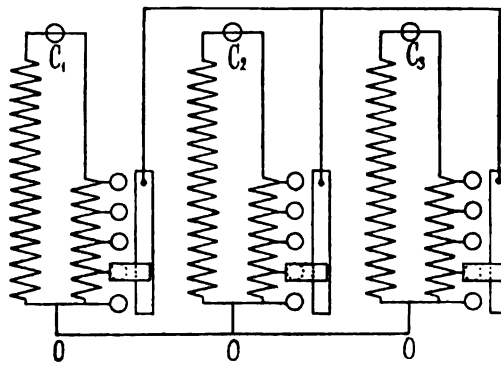
$$i \times \frac{1}{2}\,\frac{2r}{3r} = \frac{1}{3}\,i,$$

et le nombre d'ampères-tours actifs sera

$$2\,\frac{i}{3} - \frac{i}{3} = \frac{i}{3}.$$

Pour un même couple la perte de tours de l'induit doit donc être neuf fois plus grande que lorsque C_1, C_2, C_3 sont reliés en court-circuit. Quand le moteur a atteint une vitesse suffisante, la manœuvre d'un levier établit le court-circuit des

Fig. 191.



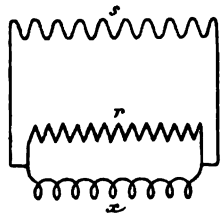
bornes C_1, C_2, C_3 et le moteur prend sa vitesse normale. La figure 191 représente une variante de ce dispositif permettant de faire varier le rapport des nombres de spires en opposition, et d'obtenir par suite une mise en marche progressive.

M. Fischer Hinnen a imaginé le procédé de démarrage suivant : il relie chaque section s de l'armature (*fig.* 192 et 193) à une résistance r shuntée par une réactance x. La résistance r est grande par rapport à celle de l'enroulement s. La réactance x est formée d'une bobine de réaction de très grande inductance et de résistance faible par rapport

Digitized by Google

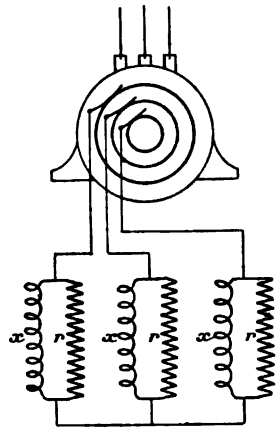
à la résistance de l'enroulement s. Au début du démarrage, l'induit étant au repos, la fréquence du courant dans le circuit extérieur est grande. La réactance x est élevée, et le

Fig. 192.



courant secondaire se ferme en majeure partie dans r. Au fur et à mesure que la vitesse augmente, la fréquence diminue; par suite la réactance x décroît, et devient très petite

Fig. 193.



pour la vitesse normale voisine du synchronisme. Le courant secondaire se ferme en petite partie par r, mais surtout par x. La résistance r et la bobine x peuvent être logées dans l'armature, qui alors ne porte pas de bagues.

Digitized by Google

IX. — *Modification de la vitesse d'un moteur d'induction.*

Nous venons de voir qu'on peut, à l'aide d'un rhéostat intercalé en série sur l'induit, faire varier la vitesse du moteur entre des limites très étendues; mais ce réglage donne lieu à une perte de puissance proportionnelle à la réduction de la vitesse. Le rendement du moteur peut donc se trouver abaissé dans une forte proportion. En outre la vitesse varierait avec la charge.

Voici un procédé de réduction de vitesse des moteurs dû à la maison Siemens et Halske. Considérons deux moteurs asynchrones à courant triphasé A et B, dont les inducteurs extérieurs sont boulonnés sur un même bâti, et dont les induits sont calés sur le même arbre. Si p est le nombre d'ondes de ces moteurs et n la fréquence du courant triphasé, et si nous relions les inducteurs de ces deux moteurs à la canalisation, ils prendront une vitesse un peu inférieure à $\frac{n}{p}$. Connectons maintenant A à la canalisation et relions les balais de son armature aux trois bornes de l'inducteur de B, puis réunissons en court-circuit les trois balais de l'induit de ce moteur B. L'induit du premier moteur produira un courant donnant naissance à un couple et en même temps excitant l'inducteur du moteur B; la machine prendra une vitesse un peu inférieure à $\frac{1}{2}\frac{n}{p}$. Ce dispositif permet donc d'obtenir, par le jeu d'un commutateur multiple, deux vitesses sensiblement dans le rapport de 1 à 2.

Lorsque ce moteur fonctionne à faible vitesse, l'inducteur de A reçoit la puissance totale et son induit fournit le courant inducteur retardé à B. Ce dispositif est donc forcément assez coûteux et d'un rendement médiocre.

Considérons maintenant un moteur dont l'inducteur est enroulé en anneau. On peut aisément grouper, au moyen d'un commutateur, les bobines inductrices de façon à produire à volonté une onde ou deux ondes, par exemple. On

Digitized by Google

obtiendra donc deux vitesses sensiblement dans le rapport de 1 à 2.

Cette méthode a été appliquée par les ateliers d'Œrlikon. Elle exige évidemment que l'enroulement de l'induit corresponde indifféremment à une onde et à deux ondes. Les enroulements d'armature qui conviennent à ce genre de moteur sont donc l'enroulement en anneau avec petites bobines en court-circuit, ou l'enroulement en cage d'écureuil.

Voici quelques données sur un moteur asynchrone à courant triphasé de 3 chevaux, à 3 vitesses, étudié par M. Behn-Eschenburg et construit par les ateliers d'Œrlikon.

L'inducteur porte un enroulement en anneau à 12 bobines reliées en série. L'armature est du système Dolivo-Dobrowolsky en cage d'écureuil.

L'inducteur est relié au moyen de 12 conducteurs à un commutateur à trois positions permettant d'obtenir à volonté 2, 4 ou 8 pôles inducteurs.

Ce moteur a été étudié de façon que l'intensité du courant à vide ainsi que la puissance du moteur soient sensiblement les mêmes pour les 3 vitesses. Les résultats des essais effectués sur ce moteur, à 110 volts et à la fréquence de 45 périodes par seconde, sont consignés dans le Tableau ci-après.

NOMBRE de pôles.	TOURS par minute.	COUPLE moteur.	PUISSANCE.	RENDEMENT pour 100.	INTENSITÉ du courant.
		mkg	chx		ampères
2.....	2700	0	0	»	9
	2650	0,8	3	77	13
	0	1,4	»	»	90
4.....	1350	0	0	0	9
	1320	1,6	3	75	13
	0	3,2	»	»	60
8.....	675	0	0	0	9
	640	2,8	2,5	70	13
	0	»	»	»	35

Nous avons vu plus haut que le changement du sens de ro-

Digitized by Google

tation du champ tournant, et par suite du moteur à courant triphasé, s'obtient simplement en inversant le courant à deux des bornes de l'inducteur.

M. Görges [1], ingénieur de la maison Siemens et Halske, appelle *induit à un axe* un induit ayant une seule bobine par onde magnétique, l'enroulement étant supposé en tambour; une armature ordinaire de moteur à courant triphasé avec trois bagues est un induit *à trois axes* magnétiques; une telle armature se transforme aisément en un induit à un axe en soulevant l'un des trois balais. M. Görges a trouvé qu'un moteur à courant triphasé, avec induit à un axe, est capable de prendre deux vitesses : l'une voisine de celle correspondant à la fréquence divisée par le nombre d'ondes, l'autre sensiblement moitié moindre.

Considérons un moteur à courant triphasé ordinaire en marche, et soulevons l'un des trois balais de l'induit : le nombre de tours par minute correspond au synchronisme, au glissement près. Si nous surchargeons ce moteur, sa vitesse tombe brusquement au-dessous de la moitié de celle correspondant au synchronisme. Si alors nous déchargeons le moteur, sa vitesse devient à peu près la moitié de celle correspondant au synchronisme. En actionnant alors ce récepteur par un moteur auxiliaire, de façon à porter sa vitesse un peu au-dessus de la moitié de celle correspondant au synchronisme, le moteur fait frein, engendre de l'énergie.

M. Görges a vérifié qu'un moteur d'induction à courant alternatif se comporte de la même manière.

Dans ces conditions un moteur d'induction est capable de développer à demi-vitesse un couple bien supérieur à celui qu'il peut développer à vitesse normale.

Le décalage du courant, à demi-vitesse, est très important.

M. Görges a expérimenté un moteur à courant triphasé muni de trois bagues, avec rhéostat de mise en marche, actionnant un ascenseur. La vitesse correspondant au synchro-

---

[1] *Elektrotechnische Zeitschrift*, 13 août 1896.

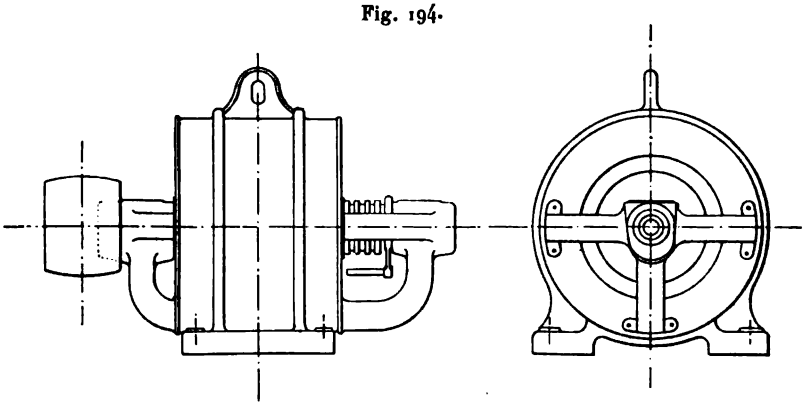
Digitized by Google

nisme est égale à 1500 tours par minute. Si l'on soulevait l'un des balais, la vitesse tombait au-dessous de la moitié de ce nombre. La cage étant parvenue au sommet de sa course, on renversa le sens de rotation du moteur : dès que la vitesse dépassa un peu 750 tours par minute, le moteur se mit à faire frein, et la vitesse de la cage resta constante.

X. — *Description de moteurs asynchrones.*

Voici quelques données sur un moteur à courant triphasé de 35 chevaux, étudié par l'auteur. Ce moteur, destiné à actionner directement un ventilateur de cubilot, est représenté par la figure 194. L'inducteur et l'induit sont enroulés

Fig. 194.



en tambour. L'armature porte trois bagues pour la mise en marche au moyen d'un rhéostat à liquide.

Puissance sur l'arbre, en chevaux	35
Nombre de tours par minute	1450
Tension aux bornes, en volts	190
Fréquence du courant, en périodes par seconde	50
Nombre d'ondes	2

Digitized by Google

Inducteur.

Diamètre extérieur du noyau, en millimètres..	564
Diamètre intérieur du noyau, en millimètres..	344
Longueur des noyaux, en millimètres.....	400
Nombre de cannelures.....	24
Nombre de conducteurs par cannelure.....	11
Section des conducteurs, en millimètres carrés.	50
Montage des bobines d'une section.....	en série
Montage des trois sections	en étoile

Induit.

Nombre de cannelures.....	36
Nombre de conducteurs par cannelure.....	4
Section des conducteurs, en millimètres carrés.	34
Montage des bobines d'une section.....	en quantité
Montage des trois sections	en étoile

Moteur Westinghouse asynchrone, de 500 chevaux. — Ce moteur, à courant triphasé, actionne un moulin. L'inducteur extérieur porte un enroulement en barres de cuivre avec connexions en V. L'induit est en cage d'écureuil. Les deux paliers forment les centres d'étoiles dont les bras aboutissent à un cercle boulonné sur le bâti de la machine. La hauteur totale du moteur est 3080^{mm}. Il occupe en plan une surface de $2850^{mm} \times 1050^{mm}$.

Puissance du moteur, en chevaux.....	500
Tension aux bornes, en volts.....	400
Nombre de tours du champ par minute.....	200
Fréquence, en périodes par seconde.....	60
Nombre d'ondes.....	18
Glissement à pleine charge, en pour 100...	4
Facteur de puissance à pleine charge.....	0,93
Diamètre extérieur du noyau induit, en millimètres.....	2100
Poids total du moteur, en kilogrammes....	19000

Le démarrage s'effectue par l'intermédiaire d'un transformateur à rapport de transformation variable permettant d'obtenir une tension faible au début, que l'on accroît au fur et à

Digitized by Google

mesure que la vitesse du moteur augmente. Le couple de démarrage est égal à 2 fois $\frac{1}{4}$ le couple normal à pleine charge.

Moteur asynchrone Alioth de 500 chevaux. — La Société Alioth a construit plusieurs moteurs asynchrones de 500 chevaux, à courant triphasé, accouplés directement à des compresseurs. L'armature fait office de volant.

L'inducteur, dont le diamètre extérieur est de 3700^{mm}, ainsi que les deux paliers sont boulonnés sur un cadre rectangulaire de fonte. Le centrage de l'armature mobile par rapport à l'inducteur est obtenu verticalement par le calage des paliers et horizontalement au moyen de coins.

Le noyau de l'armature est fixé sur la jante d'une poulie de fonte de 2806^{mm} de diamètre, à deux rangées de huit bras à section en double T.

Les segments de tôle des noyaux portent des queues d'aronde qui viennent s'engager dans des rainures des bâtis.

Les cannelures de l'inducteur et de l'induit ont la forme de trous. L'enroulement inducteur est logé dans des tubes de micanite.

L'enroulement de l'armature est formé de barres de cuivre, et est relié à trois bagues munies de balais métalliques pour le démarrage au moyen d'un rhéostat. Dès que le moteur a atteint sa vitesse normale, on ferme l'enroulement induit en court-circuit au moyen d'un dispositif spécial porté par l'arbre et l'un des paliers, puis on soulève les balais.

Puissance du moteur, en chevaux	500
Tension aux bornes, en volts	5000
Tours du champ par minute	100
Fréquence en périodes par seconde	25
Nombre d'ondes	15

Inducteur.

Diamètre intérieur du noyau, en millimètres	3000
Longueur axiale du noyau, en millimètres	750
Nombre de cannelures par pôle et par section	5
Nombre total de cannelures	450
Nombre de bobines	225
Montage des trois sections	en étoile

Digitized by Google

Induit.

Diamètre extérieur du noyau, en millimètres.	2996,5
Longueur axiale du noyau, en millimètres..	750
Nombre de cannelures par pôle et par section	8
Nombre total de cannelures	720
Montage des trois sections	en étoile
Longueur de l'entrefer, en millimètres	1,75
Poids de l'inducteur, en kilogrammes	12000
Poids de l'armature, en kilogrammes	14000

Les essais effectués sur ce moteur ont donné les résultats suivants :

1° Marche à vide, à 25 périodes par seconde et à 5000 volts :

Courant à une borne, en ampères	9,3
Perte de puissance dans le fer (calculée), en kilowatts	6
Puissance totale absorbée, en kilowatts	10,4

2° Essai en court-circuit, à la fréquence de 25 périodes par seconde :

Résistance d'une section inductrice (étoile), en ohms	1,75
Tension aux bornes, en volts	976
Puissance aux bornes, en kilowatts	25,2

On en déduit :

1° Pour la charge de 500 chevaux :

Courant à une borne, en ampères, environ.	50
Rendement, pour 100	92
Facteur de puissance	0,93
Glissement, pour 100	3
Rapport des courants à vide et à pleine charge	1 : 5,4

2° Rendement pour la charge de 370 chevaux, pour 100, 93.

3° Rendement pour la charge de 160 chevaux, pour 100, 90.

A la charge de 300 chevaux le facteur de puissance est déjà supérieur à 0,90.

Le moteur cale à la charge de 1100 chevaux.

Digitized by Google

L'isolation de l'enroulement inducteur a été essayée en faisant agir pendant une heure une tension alternative de 10000 volts entre cet enroulement et le bâti.

Moteur asynchrone à courant triphasé de 570 chevaux, à 75 tours par minute. — Ce moteur, destiné à actionner une pompe de mine élevant 5^{m^3} d'eau par minute à 400^m de hauteur, a été établi par les ateliers d'Œrlikon d'après un programme imposant une vitesse et des dimensions maxima, l'organe mobile devant agir comme volant. Le couple de démarrage devait être supérieur de 20 pour 100 au couple normal.

Le bâti annulaire de l'inducteur a un diamètre extérieur de 4000^{mm}, et est boulonné à deux étoiles de fonte dont les centres viennent s'emboîter sur les paliers de manière à supporter et à centrer exactement l'inducteur. Le noyau de tôle de l'inducteur est fixé sur son bâti au moyen de 54 boulons de 20^{mm} de diamètre. Ce noyau porte 162 bobines logées dans 324 cannelures fermées garnies de tubes de micanite.

Le volant de fonte supportant l'induit mobile a un diamètre extérieur de 2996^{mm}. L'armature porte 216 bobines logées dans 432 cannelures à moitié fermées et garnies de tubes de micanite. Chaque bobine est formée de 19 fils de cuivre nus de $3^{mm},6$ de diamètre, en parallèle.

L'inducteur et l'induit sont en deux parties boulonnées.

Puissance du moteur, en chevaux	570
Tension aux bornes, en volts	1900
Courant à une borne, en ampères	170
Tours du champ par minute	75
Fréquence, en périodes par seconde	22,50
Nombre d'ondes	18
Longueur de l'entrefer, en millimètres	2

Inducteur.

Nombre de cannelures par pôle et par section	3
Nombre total de cannelures	324
Nombre de bobines	162
Montage des trois sections	en triangle
Poids de l'inducteur, en kilogrammes	11000

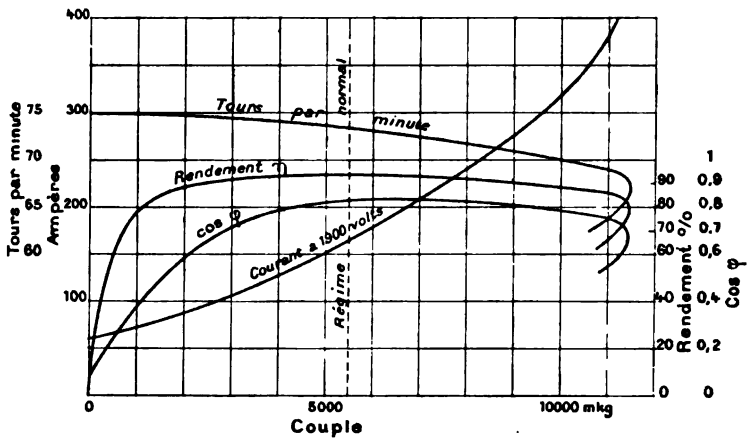
Digitized by Google

Induit.

Nombre de cannelures par pôle et par section	4
Nombre total de cannelures	432
Nombre de bobines	216
Montage des trois sections	en triangle
Poids de l'armature, en kilogrammes	8000
Rayon de giration de l'armature, en mètres	1,5
Poids de la tôle, en kilogrammes	9000
Poids du cuivre, en kilogrammes	1400
Poids total du moteur, en kilogrammes	28000

L'enroulement induit est relié d'une part à trois bagues pour la mise en marche au moyen d'un rhéostat de démarrage, et d'autre part à trois bornes intérieures que l'on met en court-circuit, après démarrage, au moyen d'un volant, en soulevant ensuite les balais.

Fig. 195.



Les essais effectués sur ce moteur ont donné les résultats suivants (*fig.* 195) :

Résistance d'une section de l'inducteur (triangle), en ohm	0,4
Résistance d'une section de l'armature (triangle), en ohm	0,016

Digitized by Google

1° Essai du moteur à vide :

Fréquence, en périodes par seconde.....	22,5
Tension aux bornes, en volts.....	1900
Courant à une borne, en ampères.....	62
Puissance totale aux bornes, en kilowatts.....	16
Puissance absorbée par les frottements et la ventilation, en kilowatts.....	3,5
Élévation de température au-dessus de la température ambiante.....	18°

2° L'armature étant calée et mise en court-circuit :

Fréquence, en périodes par seconde.....		22,5
Tension aux bornes, en volts.....	390	600
Courant à une borne, en ampères.....	110	200
Coefficient de dispersion pour 190 ampères....		0,1

On en déduit pour la charge de 570 chevaux :

Courant à une borne, en ampères, environ...	170
Rendement, pour 100.....	92
Cosφ.....	0,82
Glissement, pour 100.....	2,7

Le couple maximum est 11500^{mkg}, soit environ le double du couple à pleine charge (5480^{mkg}).

Pour un moteur normal de 570 chevaux, à la fréquence de 50 périodes par seconde, on aurait :

Rendement, pour 100.....	94
Cosφ.....	0,92
Glissement, pour 100.....	1,5
Rapport du couple maximum au couple normal.	2 à 2,5

Les moteurs Alioth asynchrones à courant triphasé ont l'inducteur et l'induit enroulés en tambour. D'après les indications du constructeur ces moteurs peuvent supporter une surcharge momentanée de 100 pour 100, et développer leur puissance indiquée sur le Tableau ci-joint même à une tension inférieure de 33 pour 100 à la tension normale.

Digitized by Google

Moteurs Alioth asynchrones à courant triphasé.

Fréquence : 50 périodes par seconde.

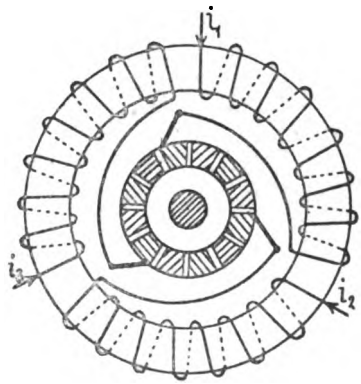
TYPE DM.	PUISSANCE en chevaux.	NOMBRE de tours par minute.	RENDEMENT à		cos φ à		GLISSEMENT à pleine charge par rapport à la marche à vide.
			pleine charge.	demi-charge.	pleine charge.	demi-charge.	
1.....	$\frac{1}{4}$	1300	65	53	0,80	0,60	6 %
2.....	$\frac{1}{2}$	1300	70	59	0,80	0,65	6
3.....	1	1400	75	62	0,85	0,70	5
4.....	2	1400	80	67	0,85	0,70	5
5.....	4	1400	80	68	0,87	0,72	4
6.....	6	1420	82	71	0,87	0,72	4
7.....	8	1430	82	72	0,87	0,72	4
8.....	10	1440	84	75	0,90	0,75	3,5
8 ½.....	13	1440	84	75	0,90	0,75	3,5
9.....	15	960	86	77	0,90	0,75	3,5
10.....	20	960	86	78	0,90	0,77	3,5
11.....	25	965	88	86	0,90	0,77	3,0
12.....	40	970	88	80	0,90	0,78	3,0
I.....	50	720	90	83	0,90	0,78	2,5
II.....	65	720	90	83	0,90	0,78	2,5
III.....	80	720	90	83	0,91	0,79	2,5
IV.....	100	580	91	84,5	0,91	0,79	2
V.....	125	485	91	84,5	0,91	0,79	2
VI.....	180	420	92	86	0,91	0,79	2
VII.....	250	365	92	86	0,91	0,79	2

La figure 196 indique le principe d'un moteur à courant triphasé imaginé par la maison Siemens et Halske. Il se compose d'un anneau fixe muni de trois bobines recevant le courant triphasé. A l'intérieur de cet inducteur est mobile un anneau Gramme (non représenté sur la figure) portant un collecteur à lames; sur celui-ci frottent trois balais reliés aux extrémités des trois bobines inductrices. Ces trois balais sont portés par un même balancier.

Digitized by Google

Le courant triphasé engendre dans l'anneau extérieur un champ tournant. L'anneau intérieur, dont l'enroulement figure le montage en triangle, reçoit le courant triphasé, la phase d'un courant dans une section de l'induit comprise entre deux balais différant de 30° de celle du courant à l'un de ces balais. Les trois courants dans l'armature engendrent également un champ tournant. Grâce à l'emploi du collecteur, les courants arrivent à l'anneau intérieur en des points fixes dans l'espace, quelle que soit la vitesse de rotation; le

Fig. 196.



champ tournant développé dans cet anneau fait donc un tour par période, comme celui de l'anneau fixe.

En calant les balais de façon que ces deux systèmes de champs ne soient pas dirigés suivant les mêmes rayons, l'anneau mobile tendra à rapprocher l'un de ses pôles, nord par exemple, d'un pôle contraire de l'anneau extérieur. Mais le jeu du collecteur assignera à ces deux pôles une distance dépendant du calage des balais. Si ce calage est tel que les pôles des deux anneaux soient en regard, le moteur ne tournera pas. Le sens de rotation du moteur dépendra du sens suivant lequel on calera les balais à partir de cette position de repos.

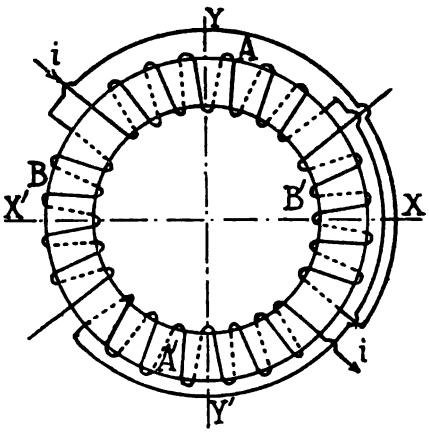
Nous n'avons pas connaissance d'application industrielle de ce moteur.

Digitized by Google

XI. — *Moteurs d'induction à courant alternatif.*

Un moteur d'induction à courant alternatif à une onde se compose d'un inducteur muni de deux bobines A, A′ (*fig.* 197) à l'intérieur duquel se trouve l'induit mobile. Celui-ci porte une série d'enroulements en court-circuit, identiques à ceux d'un moteur à courant polyphasé. Cet enroulement, en anneau ou en tambour, peut être diphasé ou triphasé, être formé d'un certain nombre de bobines fermées sur elles-

Fig. 197.



mêmes, ou encore être constitué par une cage d'écureuil. Si l'enroulement est diphasé ou triphasé, il peut être relié à trois bagues calées sur l'arbre et servant à la mise en marche au moyen d'un rhéostat.

Le courant alternatif, en traversant les deux bobines A, A′ de l'inducteur, crée un champ alternatif suivant XX′. Tant que l'armature est fixe, ce champ engendre dans les enroulements de cet organe des courants, comme dans le secondaire d'un transformateur. Si l'on imprime à l'induit une certaine vitesse, il se produit dans ses enroulements des courants qui engendrent un champ alternatif suivant YY′ perpendicu-

Digitized by Google

laire à XX'. Ce champ composé avec le champ principal donne naissance à un champ tournant qui tend à entraîner l'induit, comme dans le cas d'un moteur à courant polyphasé. Ce champ auxiliaire agissant sur les courants engendrés dans l'induit par le champ principal produit le couple moteur : c'est donc le champ moteur. Son intensité est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit. Il est nul lorsque l'induit est au repos, et maximum, dans le cas d'un moteur proprement dit à une onde, lorsque le nombre de tours de l'induit par seconde est égal à la fréquence du courant inducteur. A ce moment, si la résistance des enroulements induits était nulle, l'intensité du champ moteur serait égale à celle du champ inducteur. En pratique, la résistance de l'enroulement induit n'étant pas négligeable, ce champ, même pour le synchronisme, est toujours un peu inférieur au champ inducteur.

Le couple moteur est donc nul lorsque la vitesse de l'induit est nulle; il est également nul lorsque le synchronisme est atteint.

Le courant dans l'induit est la résultante de deux composantes rectangulaires : le courant de travail produisant le couple moteur, et le courant d'aimantation engendrant le champ moteur; ce dernier courant est proportionnel à la réluctance du circuit magnétique.

Pour une puissance et un champ donnés, l'échauffement dans l'induit du moteur à courant alternatif est donc plus grand que si l'inducteur fonctionnait par courant polyphasé.

En pratique, un moteur asynchrone à courant alternatif a une puissance normale d'environ un tiers inférieure à celle du même moteur fonctionnant comme moteur à courant polyphasé.

Le sens de rotation est celui qu'on imprime au moteur.

Pour la mise en marche, on peut munir l'inducteur de deux bobines B, B' disposées perpendiculairement aux bobines A, A'. On relie l'une des extrémités de cet enroulement auxiliaire directement à l'une des bornes du moteur, l'autre extrémité étant connectée à la seconde borne par l'intermédiaire d'une bobine de self-induction ou d'un condensateur, et d'un interrupteur. La bobine ou le condensateur décalent

Digitized by Google

le courant dans l'enroulement auxiliaire; il se produit donc un champ tournant qui tend à entraîner l'induit; lorsque celui-ci a atteint une vitesse suffisante, on ouvre l'interrupteur de l'enroulement auxiliaire, et le moteur continue à tourner. Pour augmenter le couple et réduire le courant de démarrage, il convient d'employer un rhéostat de mise en marche sur l'armature, comme pour les moteurs à courant polyphasé.

Digitized by Google

CHAPITRE VII.

COMPTEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR COURANTS POLYPHASÉS.

§ I. — Compteurs pour courant diphasé.

La mesure de l'énergie d'un courant diphasé s'effectue au moyen de deux compteurs pour courant alternatif. La bobine à gros fil de l'un de ces appareils est montée en série avec l'un des câbles d'une section, tandis que la bobine en fil fin est connectée aux deux conducteurs de cette section. Le second compteur est monté de la même façon sur la seconde section. Ces deux appareils peuvent être remplacés par un compteur double. Par exemple, un compteur E. Thomson pour courant diphasé se composera de deux paires de bobines d'inducteur et de deux armatures calées sur l'arbre du plateau-frein.

§ II. — Compteurs pour courant triphasé.

I. — *Considérations générales.*

L'emploi d'un seul wattmètre ou d'un seul compteur à courant alternatif, montés sur l'une des trois sections, ne fournit une mesure exacte de la puissance ou de l'énergie d'un courant triphasé que dans le cas particulier où les trois sections sont également chargées et parfaitement équivalentes.

On admet généralement que la puissance absorbée par un moteur à courant triphasé est répartie également entre les trois sections. Cette hypothèse est en général inexacte s'il existe en même temps d'autres charges inégalement répar-

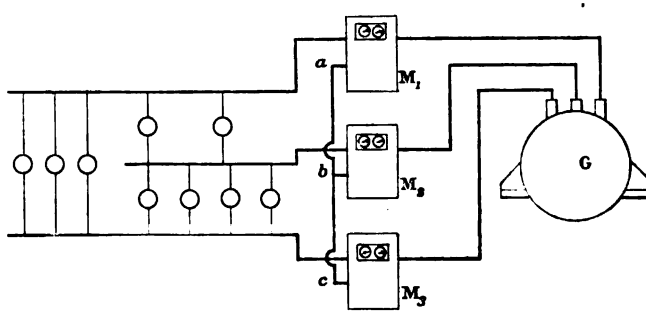
Digitized by Google

ties. Si, par exemple, il y a, en outre des moteurs, des lampes dont la charge ne soit pas également distribuée entre les trois sections, les moteurs agissent comme compensateurs en absorbant une puissance plus grande sur la section ou les sections les moins chargées par les lampes, et une puissance moindre sur la section ou les sections sur lesquelles la charge d'éclairage est plus forte.

Dans le cas où la charge par les lampes serait exceptionnellement grande et très inégalement répartie, et si en outre la chute de tension dans les canalisations et les transformateurs était importante, il pourrait arriver que le moteur prît toute sa puissance sur deux sections seulement, et même en restituât une partie à la section le plus fortement chargée. Ainsi, avec un certain montage d'un wattmètre ou d'un compteur unique à courant alternatif, le moteur semblerait engendrer une certaine puissance, tandis qu'avec d'autres connexions de l'instrument la puissance ou l'énergie enregistrées seraient très notablement supérieures aux valeurs réelles.

La mesure de la puissance ou de l'énergie d'un courant triphasé peut être effectuée au moyen de trois wattmètres

Fig. 198.



ou de trois compteurs à courant alternatif dont les bobines à gros fil sont montées en série respectivement avec les trois conducteurs de l'installation. Les trois bobines en fil fin sont reliées chacune d'une part au conducteur corres-

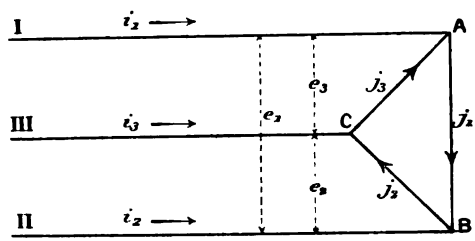
Digitized by Google

pondant, tandis que leurs trois extrémités sont réunies ensemble. Ces trois bobines sont donc montées en étoile, la connexion *abc* (*fig.* 198) représentant un point neutre. La tension aux bornes de chaque bobine en fil fin coïncide en phase avec le courant qui circulerait dans le conducteur correspondant si les récepteurs étaient sans inductance ni capacité.

La figure 198 représente ce dispositif que l'on adopte quelquefois dans les usines génératrices comme *compteur de fabrication,* et qui permet de contrôler la répartition de la charge sur les trois sections.

Considérons une installation d'abonné, les récepteurs étant montés en triangle entre les trois conducteurs I, II, III ame-

Fig. 199.



nant le courant triphasé (*fig.* 199). ABC représente l'ensemble des récepteurs, lampes, moteurs, etc.

Soient, à un instant t quelconque,

e_1, e_2, e_3 les tensions entre les trois conducteurs I, II, III;

i_1, i_2, i_3 les courants dans ces trois conducteurs;

j_1, j_2, j_3 les courants dans les sections AB, BC, CA.

La puissance instantanée dans l'ensemble des circuits récepteurs a pour expression

$$p = e_1 j_1 + e_2 j_2 + e_3 j_3. \tag{1}$$

Digitized by Google

Nous avons vu précédemment que l'on a

$$(2) \qquad e_1 + e_2 + e_3 = 0,$$

$$(3) \qquad i_1 = j_1 - j_3,$$

$$(4) \qquad i_2 = j_2 - j_1.$$

En retranchant

$$j_1(e_1 + e_2 + e_3) = 0$$

du second membre de la relation (1), il vient

$$(5) \qquad p = e_2(j_2 - j_1) - e_3(j_1 - j_3)$$

ou, en vertu de (3) et (4),

$$(6) \qquad p = e_2 i_2 - e_3 i_1.$$

La puissance moyenne d'un courant triphasé peut donc être mesurée au moyen de deux wattmètres à courants alternatifs : la bobine à gros fil de l'un de ces instruments est intercalée en série sur le conducteur II, tandis que sa bobine en fil fin est montée entre ce conducteur et le conducteur III. La bobine à gros fil du second wattmètre est en série avec le conducteur I, et sa bobine en fil fin est montée entre I et III.

On mesure donc les courants dans deux conducteurs et les tensions entre chacun de ces conducteurs, d'une part, et le troisième conducteur d'autre part.

Si l'on veut que les deux lectures soient à ajouter algébriquement, on renverse les connexions de la bobine en fil fin du second wattmètre.

Si la puissance moyenne ne varie pas rapidement, on peut évidemment effectuer la mesure par deux lectures successives à l'aide du même wattmètre.

Digitized by Google

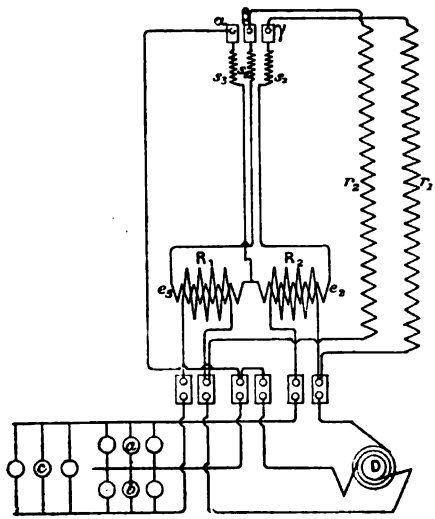
II. — *Compteur Aron pour courant triphasé.*

Un compteur d'énergie a pour fonction d'enregistrer la quantité

$$\int_{t_0}^{t_1} p\,dt.$$

M. Aron a combiné d'après le principe que nous venons d'exposer son compteur d'énergie électrique pour courant triphasé. Le pendule retardateur porte deux bobines de fil fin mesurant les tensions e_2 et e_3 et oscillant respectivement à l'intérieur des deux bobines de gros fil R_2 et R_1 parcourues

Fig. 200.



par les courants i_2 et i_1. La figure 200 indique le montage du compteur avec la canalisation.

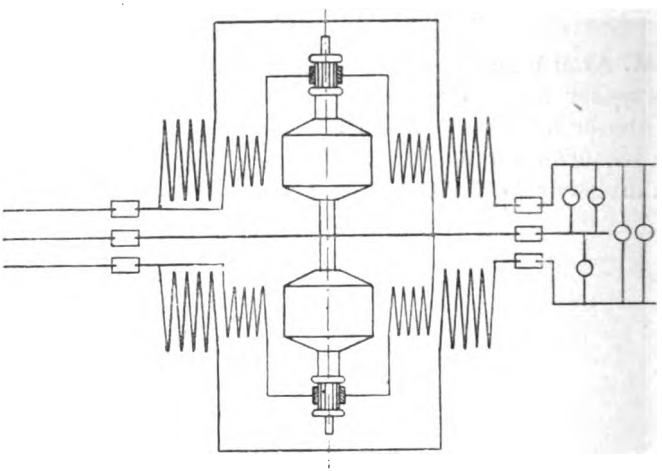
III. — *Compteur E. Thomson pour courant triphasé.*

Le professeur E. Thomson a appliqué le même principe à

Digitized by Google

son compteur d'énergie pour courant triphasé. La figure 201 est le schéma de montage de ce compteur. Deux induits calés sur l'axe du frein mesurent les tensions e_2 et e_3, les deux

Fig. 201.



paires de bobines inductrices étant parcourues par les courants i_2 et i_1.

IV. — *Compteur Siemens et Halske pour courant triphasé.*

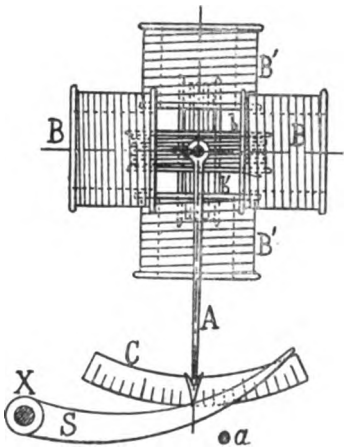
Cet appareil est analogue au compteur pour courant continu de ces mêmes constructeurs. Il se compose (*fig.* 202) de trois wattmètres mesurant la puissance du courant triphasé. Chaque wattmètre est formé de deux bobines à gros fil B, B, montées en série avec l'un des conducteurs de l'installation, et entre lesquelles oscille une bobine de fil fin *b* mesurant la tension. Les trois bobines de fil fin sont calées sur le même axe horizontal porté sur couteaux, à l'extrémité duquel est fixée une aiguille A qui se meut sur un cadran C dont les divisions indiquent les hectowatts, les kilowatts, etc. Pour éviter les actions mutuelles des trois wattmètres, les

Digitized by Google

axes des bobines du wattmètre moyen sont disposés perpendiculairement à ceux des autres bobines.

Un sabre d'aluminium S mobile autour d'un axe X est bloqué par l'aiguille du wattmètre. Un mouvement d'horlogerie fait osciller ce sabre chaque minute et quart, et un contrepoids le ramène contre l'aiguille du wattmètre. Ce sabre est limité dans sa course inférieure par un arrêt *a*. L'aiguille A peut osciller de 14° de chaque côté de sa position moyenne verticale pour laquelle la bobine de fil fin a

Fig. 202.



son plan normal à celui des deux bobines de gros fil. La courbe supérieure du sabre est telle que les angles décrits par cet organe sont proportionnels aux indications de l'aiguille du wattmètre.

Pour rendre le wattmètre apériodique, son axe est muni d'une poulie à gorge sur laquelle passe un fil dont chaque extrémité porte un petit piston mobile dans un tube de verre rempli d'huile.

L'axe du sabre actionne une minuterie à plusieurs cadrans indiquant les hectowattheures, les kilowattheures, etc.

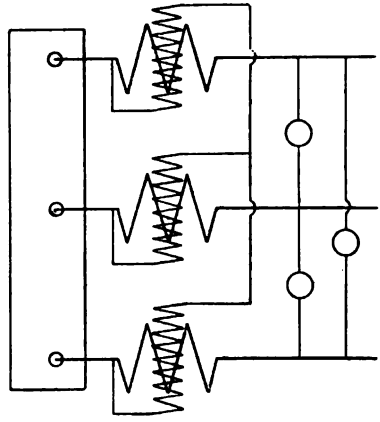
On voit donc que cet appareil est à la fois un wattmètre et un compteur d'énergie électrique.

Digitized by Google

Les bobines de fil fin du wattmètre sont montées en série avec des bobines de résistance bifilaires et par suite sans inductance.

La figure 203 est le schéma de montage de ce compteur.

Fig. 203.



V. — *Compteur Duncan.*

Le compteur de quantité Duncan pour courant alternatif est basé sur le principe du moteur Schallenberger.

Une bobine *aa* (*fig.* 204) reçoit le courant des lampes. Une cloche d'aluminium *b* est calée sur un arbre vertical portant à sa partie supérieure une vis sans fin qui actionne une minuterie. A l'intérieur de la cloche se trouve un noyau de tôle dont les extrémités sont munies d'une série de disques de cuivre formant spires en court-circuit. Cet électro joue exactement le rôle de la bobine en court-circuit du moteur Schallenberger pour engendrer le champ tournant.

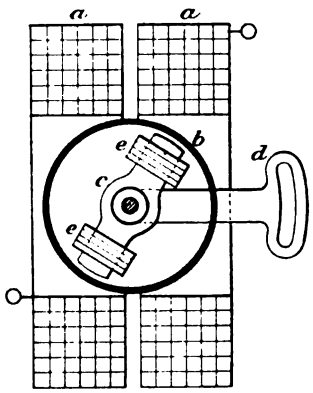
Le réglage du compteur s'obtient en modifiant, au moyen du levier à coulisse *d*, l'angle que fait l'axe de l'électro intérieur avec l'axe de la bobine *aa*. L'expérience a montré qu'un angle de 45° entre ces deux axes donne le couple moteur maximum sur la cloche *b*.

Digitized by Google

Les autres détails de construction sont analogues à ceux du compteur E. Thomson, sauf que le frein à disques et à aimants permanents est remplacé par quatre ailettes d'aluminium.

Les compteurs pour 12, 25 et 50 lampes sont exacts à partir d'une charge de deux lampes, et ils font respectivement

Fig. 204.



15, 10 et 5 tours par lampe et par minute; pour une seule lampe ils font 14, 9 et 4,25 tours par minute.

Dans les compteurs à courant triphasé la bobine *aa* est remplacée par trois bobines à 120°, à peu près tangentes au cylindre, et montées en série avec les trois conducteurs de l'abonné. L'électro intérieur porte trois branches à 120°.

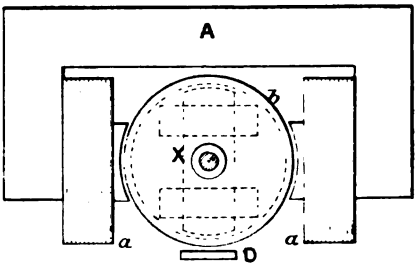
Dans les compteurs d'énergie pour courant alternatif les deux moitiés de la bobine *aa* sont portées par les extrémités polaires d'un noyau A (*fig.* 205) formé de tôles rivées. L'électro intérieur à la cloche *b* porte un enroulement en fil fin monté en série avec une bobine de réaction qui produit un retard de phase sensiblement d'un quart de période, et connecté aux deux conducteurs de l'installation.

Le champ tournant engendré par les deux électros détermine

Digitized by Google

la rotation de la cloche d'aluminium *b*. L'axe vertical X porte à sa partie supérieure une vis sans fin actionnant une minuterie et à sa partie inférieure un disque d'aluminium

Fig. 205.



tournant entre les pôles de deux aimants permanents d'acier au tungstène.

Le réglage du compteur s'obtient en déplaçant à droite ou à gauche un petit disque de fer et cuivre D mobile autour de l'axe X.

VI. — *Ondographe E. Hospitalier.*

Cet instrument a pour objet d'enregistrer directement par un tracé sur une bande de papier des quantités telles que forces électromotrices, intensités de courant, puissances, etc., variables périodiquement.

Il comprend :

1° un moteur synchrone à courant alternatif simple, à deux ondes;

2° un coupleur;

3° un appareil de mesure à aiguille;

4° un cylindre enregistreur.

Le moteur commande le coupleur par engrenages, et le cylindre enregistreur par vis sans fin et roue héliçoïdale.

Le coupleur se compose d'un cylindre en matière isolante muni d'une pièce de contact métallique, et sur lequel frottent des balais fixes reliés à la source des impulsions à enregistrer

Digitized by Google

et à l'appareil de mesure. A chaque tour le coupleur ferme pendant un temps très court la source sur l'appareil de mesure. Le rapport des engrenages est tel que pendant que le moteur fait 500 tours correspondant à $500 \times 2 = 1000$ périodes le coupleur fait $1000 - 1 = 999$ tours. Ce retard permet d'obtenir un tracé dans le même sens que l'écoulement du temps.

Sur l'axe vertical de l'appareil de mesure est calée une aiguille horizontale de 35^{cm} de longueur portant à son extrémité libre une plume effectuant le tracé sur le papier quadrillé du cylindre enregistreur. Celui-ci a son axe horizontal, perpendiculaire à la position de l'aiguille au zéro.

Pour le tracé des courbes de forces électromotrices et d'intensités l'appareil de mesure est un galvanomètre du type Deprez-d'Arsonval, par exemple, à aimant en fer à cheval horizontal avec cadre mobile vertical.

M. Hospitalier a complété l'instrument par un condensateur et un troisième balai, permettant le réglage de la sensibilité. Le coupleur charge d'abord le condensateur, puis le décharge sur le galvanomètre.

Pour l'enregistrement des puissances l'appareil de mesure est un wattmètre ordinaire dont la bobine fixe est parcourue constamment par le courant variable, et dont la bobine mobile en fil fin est soumise périodiquement à la force électromotrice. Dans ce cas le cylindre du coupleur porte simplement une languette métallique droite fermant à chaque tour, par l'intermédiaire des balais, la bobine mobile sur la source de force électromotrice.

L'équipage mobile de l'appareil de mesure a une inertie et un amortissement tels que les vibrations de l'aiguille sont insensibles.

Le moteur est établi pour 110 volts, et l'instrument convient pour des fréquences de 25 à 70 périodes par seconde.

On lance le moteur synchrone à la main au moyen d'une manivelle qui se déclenche automatiquement dès que le synchronisme est atteint. Ce synchronisme est indiqué par l'immobilité apparente d'un disque muni de secteurs alternativement blancs et noirs éclairé par une lampe à incandescence.

Digitized by Google

CHAPITRE VIII.

APPLICATION DES COURANTS POLYPHASÉS A LA TRACTION.

§ I. — Considérations générales.

Lorsqu'on emploie pour la traction le courant continu à la tension normale de 500 à 600 volts, admise par les règlements pour les tramways installés sur la voie publique, la longueur des lignes que l'on peut exploiter par ce système est très limitée, car au delà d'une certaine distance le coût de la canalisation devient exorbitant, le rendement faible, l'utilisation des moteurs médiocre et le réglage très imparfait.

La longueur maximum d'une ligne de tramway ou de chemin de fer pouvant être actionnée directement par un courant continu de 500 à 600 volts, longueur comptée à partir de l'usine génératrice, dépend du profil de la voie, de l'importance du matériel roulant, des conditions d'exploitation, etc. Une distance de 15^{km} peut être considérée en pratique à peu près comme un maximum. L'emploi de feeders commandés par des survolteurs en tension, excités en série, permet d'améliorer le réglage de la distribution.

Si le nombre des trains circulant sur la ligne est important, on peut adopter la distribution par courant continu à trois fils, en utilisant les rails comme conducteur neutre. La tension sur chaque pont étant de 500 à 600 volts, la tension entre les conducteurs aériens est de 1000 à 1200 volts. Ce système permet d'actionner au moyen du courant continu des lignes de plus grande longueur et à circulation plus intense que la distribution à deux fils. Si la charge n'était pas suffisamment répartie sur les deux ponts, il conviendrait d'employer une machine d'équilibre.

Enfin, dans le cas où une ligne de chemin de fer n'em-

Digitized by Google

prunterait pas le domaine public, et si les règlements ne s'y opposaient pas, il serait possible d'adopter une tension de 1000 volts environ, tension que l'on peut considérer actuellement comme un maximum pour les moteurs à courant continu, principalement eu égard au collecteur.

Si la longueur de la ligne, ou des lignes, à partir de l'usine génératrice, qu'il n'est du reste pas toujours possible de placer au point le plus favorable pour la distribution, est considérable, la puissance électrique doit être transportée sous une tension élevée. Deux méthodes principales peuvent être appliquées :

Première méthode. — La puissance électrique est transportée sous forme de courant polyphasé de haute tension, mais elle est distribuée aux véhicules sous forme de courant continu à la tension normale de 500 à 600 volts.

Le courant polyphasé est amené à une série de sous-stations convenablement placées le long de la voie et comprenant chacune un ou plusieurs transformateurs rotatifs ou convertisseurs fournissant le courant continu à la tension normale de 500 à 600 volts à la ligne de contact, éventuellement par l'intermédiaire de feeders. Ce système permet donc d'utiliser les équipements courants, tant pour les moteurs et leur réglage que pour la ligne de contact, en employant un seul conducteur aérien avec retour par les rails.

Deuxième méthode. — La puissance électrique est transportée sous forme de courant polyphasé, et distribuée aux véhicules sous la même forme. Ce système ne comporte donc pas de transformateurs rotatifs ou de convertisseurs qui diminuent quelque peu le rendement, constituent une dépense appréciable de premier établissement et d'entretien, et exigent une certaine surveillance pour leur mise en marche, leur graissage, etc.

Le courant polyphasé adopté est naturellement le courant triphasé.

Digitized by Google

§ II. — Transport de la puissance par courant polyphasé et distribution aux véhicules par courant continu.

Cette méthode utilisant les procédés courants de traction électrique a été appliquée la première.

La transformation du courant polyphasé en courant continu a été effectuée tout d'abord au moyen d'une génératrice à courant continu manchonnée directement avec un moteur synchrone à courant polyphasé. Le moteur synchrone ayant un facteur de puissance voisin de l'unité et une vitesse qui ne dépend que de la fréquence du courant polyphasé, et non de la charge, est généralement préféré au moteur asynchrone. Citons, parmi les installations qui ont adopté le transformateur rotatif formé de deux machines, les tramways de Folsom-Sacramento, de Norwich (Amérique) et ceux de Dublin (Irlande).

Le convertisseur est en général supérieur au groupe moteur-génératrice au point de vue du rendement, de la sécurité de fonctionnement, du réglage et du coût de premier établissement. Aussi est-il actuellement adopté presque exclusivement pour la traction. En Amérique il est appliqué aux tramways de Lowell, de Buffalo, de Lewiston, Brunswick et Bath, au métropolitain de New-York, au chemin de fer élevé de Manhattan, etc. En France le chemin de fer métropolitain et une série de lignes de tramways de Paris, ainsi que les tramways de Marseille, ont adopté le convertisseur.

Dans le cas d'un chemin de fer établi en dehors de la voie publique, l'amenée du courant continu aux voitures ou aux locomotives peut être effectuée au moyen d'un troisième rail d'acier, disposé d'ordinaire latéralement à la voie, et fixé sur les mêmes traverses, mais soigneusement isolé. Le nombre et les dimensions des frotteurs peuvent être aisément appropriés à l'intensité du courant absorbé par les véhicules. Les rails de la voie servent de conducteur de retour.

Si l'usine génératrice est installée à proximité de la ligne de tramways ou de chemin de fer, il peut être avantageux

Digitized by Google

d'éviter toute transformation de la puissance fournie au tronçon de la ligne situé dans le voisinage de l'usine génératrice. Cette usine peut alors comprendre simultanément des machines à courant continu et des machines à courant polyphasé, ou bien des génératrices à double courant.

Le chemin de fer de Saint-Paul et Minneapolis est alimenté par une usine située à la chute de Saint-Anthony et comportant deux machines à courant continu de 700 kilowatts et cinq machines à courant triphasé de 700 kilowatts à 3 450 volts. Les génératrices à courant continu alimentent directement la portion de la ligne située dans le voisinage de l'usine, tandis que le courant triphasé à 3450 volts alimente par câble souterrain la sous-station de Minneapolis. La ville de Saint-Paul étant trop éloignée pour être desservie par le courant triphasé à 3450 volts, le feeder est alimenté par une batterie de transformateurs élévateurs.

Les sous-stations de Minneapolis et de Saint-Paul renferment des transformateurs réducteurs desservant six convertisseurs de 600 kilowatts, compoundés de façon à maintenir la tension du courant continu constante, indépendamment de la charge. On a suppléé l'inductance des feeders en intercalant sur chacun d'eux trois bobines de réaction de 30 kilovoltampères. Les machines à courant continu et les convertisseurs sont connectés au même réseau de fil de trolley. L'équipement électrique de cette ligne et celui des voitures sont de type courant.

Les tramways de Lewiston, Brunswick et Bath desservent et relient les villes de Lewiston et de Bath, distantes de 48^{km}. Le réseau a un développement total de 96^{km}.

L'usine génératrice, située à Brunswick, utilise une puissance de 1000 chevaux empruntée à une chute de $5^{m},20$ environ obtenue à l'aide d'un barrage établi sur la rivière Androscoggin. Quatre turbines Victor attaquent un même arbre qui lui-même commande par courroie un contre-arbre. Celui-ci actionne trois génératrices à double courant de 250 kilowatts, à 12 pôles, faisant 600 tours par minute, et pouvant fournir la puissance de 250 kilowatts soit sous forme

Digitized by Google

de courant continu à 500-550 volts, soit sous forme de courant triphasé à 300-330 volts, à la fréquence de 60 périodes par seconde. L'inducteur, extérieur, est formé d'une culasse circulaire de fonte portant encastrés 12 noyaux polaires laminés. L'enroulement de l'armature est formé de barres de cuivre. Ces machines sont surcompoundées de façon à fournir 500 volts à vide et 550 volts à pleine charge de courant continu; elles peuvent supporter une surcharge de 50 pour 100 pendant 3 heures.

Le tableau comprend 7 panneaux de marbre sur armature de fer et fonte, dont trois pour le courant continu et trois pour le courant triphasé des génératrices.

Six transformateurs Westinghouse de 125 kilowatts, connectés trois par trois en étoile, élèvent la tension de 330 volts à 10000 volts.

Une ligne aérienne de 16^{km}, formée de 3 fils de cuivre nus, alimente Bath; une seconde ligne, de 32^{km} de longueur, dessert Lewiston.

La ville de Lewiston possède une sous-station munie de deux convertisseurs de 200 kilowatts, à 10 pôles, faisant 720 tours par minute, et trois transformateurs de 150 kilowatts. A Bath, il y a deux sous-stations renfermant un convertisseur de 200 kilowatts et trois transformateurs de 75 kilowatts. Les convertisseurs portent un enroulement série tel que la machine fonctionnant comme génératrice de courant continu donne 500 volts à vide et 625 volts à pleine charge.

Les rampes maxima sont de 80^{mm} par mètre. Un fil de cuivre nu de 107^{mm^2} de section suit la ligne de trolley sur toute sa longueur pour la renforcer.

§ III. — Transport et distribution aux véhicules de la puissance par courant polyphasé.

I. — *Généralités.*

L'emploi du moteur à courant polyphasé pour la propulsion des véhicules permet la distribution la plus simple dans

Digitized by Google

le cas de lignes de chemin de fer de grande longueur ou de tramways éloignés de l'usine génératrice, cette distribution étant effectuée uniquement par des canalisations et, en général, par des transformateurs statiques qui n'exigent pas la présence d'un surveillant mais seulement une inspection à des intervalles de temps éloignés.

En outre, le moteur à courant polyphasé offre plusieurs avantages sur le moteur à courant continu.

Il n'a pas de commutateur, le courant pris à la ligne pénètre dans l'inducteur par des bornes fixes; l'enroulement est immobile et peut être très bien isolé dans les cannelures du noyau. On peut donc adopter une tension aux bornes beaucoup plus élevée que pour le moteur à courant continu. Du reste l'armature ne possède que des bagues lisses, et la tension dans cet organe, très faible en marche normale, peut être choisie peu élevée au démarrage.

Le moteur à courant polyphasé se prête spécialement à la traction des chemins de fer à grande vitesse, des trains lourds sur les fortes rampes où les locomotives à vapeur sont prohibées par leur poids. Dans ces cas la grande puissance nécessaire peut être fournie aux véhicules sous une tension assez élevée pour que l'intensité du courant à la prise ne soit pas exagérée. Pour une même intensité les étincelles qui se produisent entre le conducteur et la pièce de contact mobile sont moins destructives dans le cas du courant alternatif que dans le cas du courant continu.

Le moteur à courant polyphasé peut produire un couple de démarrage égal et même supérieur à celui que peut développer le moteur à courant continu.

Le montage en tandem-multiple, correspondant au montage en série-parallèle des moteurs à courant continu, permet de faire varier la vitesse dans le rapport de 1 à 2.

La vitesse est sensiblement constante, indépendante de la charge. Cette propriété est avantageuse dans le cas où le profil n'est pas trop accidenté, car alors elle simplifie la manœuvre du régulateur. Dans les fortes pentes la vitesse devient un peu supérieure à la vitesse du synchronisme, ou à la moitié de cette quantité dans le cas du montage de deux moteurs en tandem, le moteur fait frein et peut restituer de

Digitized by Google

l'énergie à la ligne, et par suite procurer une certaine économie. Ce freinage automatique dans les fortes rampes donne une grande sécurité. Nous verrons du reste comment on peut rendre ce freinage indépendant de la ligne de contact.

Dans les villes, l'emploi du courant polyphasé pour les tramways supprimerait presque complètement l'électrolyse des conduites d'eau, de gaz, d'électricité, etc., même si les rails formaient troisième conducteur.

On a fait plusieurs objections à l'emploi du moteur à courant polyphasé pour la traction :

1° Le courant polyphasé exige trois conducteurs, c'est-à-dire au moins deux fils aériens, si l'on utilise les rails comme troisième conducteur. Dans ce dernier cas les lignes téléphoniques doivent comporter deux fils isolés. Cette condition ne constitue pas une entrave en France où le double fil est adopté d'une façon générale pour les lignes téléphoniques. Ces deux conducteurs aériens sont plus encombrants que le fil unique dans le cas du courant continu. Cette objection n'est pas grave, le principal encombrement étant dû aux poteaux et aux fils transversaux.

2° Les aiguillages et les croisements à double fil sont compliqués. On évite aisément cette difficulté en supprimant l'un des deux fils de chaque ligne. Le moteur fonctionne alors pendant un temps très court comme moteur à courant alternatif asynchrone.

3° La vitesse du moteur asynchrone est sensiblement constante, indépendante des variations du profil. Nous avons déjà dit que cette constance de la vitesse est un avantage dans certains cas, et qu'il est du reste possible d'obtenir deux vitesses dans des conditions de bon rendement.

4° La perte de tension dans la canalisation à courant polyphasé est la résultante de la perte par résistance et de la perte par réactance. Cette perte de tension croît donc avec la fréquence. D'autre part, le couple d'un moteur à courant polyphasé varie comme le carré de la tension, tandis que le couple d'un moteur série à courant continu est indépendant de la tension à ses bornes. La perte de tension admissible dans une canalisation de tramway ou de chemin de fer à cou-

Digitized by Google

rant polyphasé est donc inférieure à celle qui serait acceptable dans le cas du courant continu.

On peut réduire cette perte par impédance soit en adoptant une fréquence peu élevée, soit en alimentant la ligne de contact en un nombre de points suffisamment rapprochés.

5° Lorsque les rails forment l'un des conducteurs de la ligne de contact, le courant alternatif tend à se localiser dans les couches extérieures du métal dont la section est grande et la perméabilité magnétique élevée. La résistance des rails au courant alternatif croît avec la fréquence.

Les deux sections formées chacune par l'un des conducteurs aériens d'une part et par les rails d'autre part possèdent une grande inductance par suite de l'éloignement des deux conducteurs.

On peut réduire la perte de tension produite par les deux causes précédentes soit en adoptant une fréquence peu élevée, soit en multipliant les points d'alimentation de la ligne de contact. Dans certains cas on n'utilise pas les rails pour la distribution, et l'on adopte trois conducteurs aériens. Si la ligne de contact est à haute tension la perte supplémentaire de tension due à la réactance est alors de faible importance.

6° On donne au moteur à courant polyphasé un faible entrefer afin de réduire au minimum la composante d'excitation et la dispersion. Un moteur à courant triphasé pour traction, d'une puissance normale de 30 chevaux à 960 tours par minute, à la fréquence de 50 périodes par seconde, a un entrefer de 1^{mm} à $1^{mm},5$ de longueur, tandis qu'un moteur à courant continu pour traction de même puissance a un entrefer de $2^{mm},5$ à 3^{mm}. Le moteur à courant triphasé exige donc un centrage de l'armature plus précis, ainsi que des dispositions réduisant l'usure des coussinets à une très faible valeur. Ce dernier résultat s'obtient en donnant aux portées de l'arbre de grandes dimensions. La longueur des paliers peut être un obstacle pour l'installation du moteur lorsque l'espace disponible est très limité. En outre, les paliers exigent une plus grande surveillance que dans le cas du moteur à courant continu.

Digitized by Google

II. — *Divers modes de distribution de la puissance.*

Les différents systèmes de traction par moteur à courant polyphasé peuvent être répartis dans deux classes principales :

Première classe. — La puissance est produite par l'usine génératrice sous une tension élevée, et est distribuée aux véhicules sous une tension telle qu'elle peut être utilisée directement par les moteurs. Cette tension de distribution varie entre 400 et 4000 volts, suivant les conditions d'installation et la puissance des moteurs.

En général, une ligne à trois conducteurs amène le courant de haute tension à une série de postes de transformateurs disposés aux points les plus convenables de la voie. Les enroulements secondaires de ces transformateurs alimentent la ligne de contact; celle-ci est formée généralement de deux conducteurs aériens montés d'une façon analogue à ceux des tramways à courant continu, sur lesquels les véhicules prennent le courant au moyen d'organes de contact tels que trolleys, perches avec contact à gouttière, archets, etc. Les rails constituent le troisième conducteur.

Cette catégorie comprend en particulier les tramways, installés sur la voie publique, pour lesquels une tension élevée est prohibée.

Nous citerons comme exemples le tramway de Lugano, les chemins de fer de Stansstad à Engelberg, de la Jungfrau, de Varese, de Lecco-Colico-Sondrio-Chiavenna.

Tramway de Lugano. — Le courant triphasé à 5000 volts, 40 périodes par seconde, d'une génératrice de 100 kilowatts est amené à Lugano par une ligne aérienne de 12^{km} de longueur, formée de trois fils de cuivre de 5^{mm} de diamètre. Des transformateurs installés à Lugano, milieu de la ligne de tramway, dont la longueur est de 4900^{m}, ainsi qu'en d'autres points de la voie, réduisent la tension à 400 volts. La canalisation de contact est formée de deux fils de cuivre aériens, de 6^{mm} de diamètre, distants de 250^{mm}, placés à la même

Digitized by Google

hauteur; les rails forment troisième conducteur. Il y a quatre voitures à 24 places, actionnées par un moteur asynchrone de 20 chevaux. La vitesse est de 15^{km} à l'heure. La rampe maximum est de 60^{mm} par mètre. Chaque voiture porte deux perches munie d'un frotteur en forme de gouttière.

Chemin de fer de Stansstad à Engelberg. — La voie a 22^{km} de longueur, dont $20^{km},5$ avec rampe maximum de 5 pour 100, et $1^{km},5$ à crémaillère avec rampes de 8 à 25 pour 100. Le matériel roulant moteur se compose de deux locomotives de 150 chevaux et de cinq voitures automotrices de 70 chevaux. La ligne de contact est formée de deux fils de cuivre dur de 8^{mm} de diamètre, situés à 950^{mm} d'axe en axe, et supportés par des fils transversaux fixés à des poteaux de bois. Le troisième conducteur est constitué par les rails.

Les génératrices à courant triphasé à 750 volts, 32,5 périodes par seconde, fournissent directement une partie de leur puissance à la ligne de contact; l'autre partie est portée à la tension de 5000 volts pour le transport au moyen d'une batterie de trois transformateurs de 30 kilowatts. Une batterie de trois transformateurs réducteurs de 30 kilowatts chacun alimente partiellement la ligne de contact à 750 volts. Les véhicules prennent le courant au moyen de deux archets doubles.

Chemin de fer de la Jungfrau. — La longueur de la voie, simple, est d'environ 20^{km}; les rampes maxima sont de 25 pour 100. Les locomotives ont une puissance de 250 chevaux. La ligne primaire aérienne a une longueur de 10^{km} entre l'usine et le point où elle rejoint la voie; elle est formée de trois fils de cuivre nus de $7^{mm},5$ de diamètre. Le courant triphasé est produit à la tension de 7000 volts et à la fréquence de 38 périodes par seconde. La perte totale en ligne est de 10 pour 100.

La ligne de contact est formée de deux fils de cuivre dur de 9^{mm} de diamètre distants de 400^{mm} et supportés tous les 30^{m} par des fils transversaux fixés à des poteaux de bois. Le troisième conducteur est constitué pas les rails. La tension dans cette ligne est de 500 volts.

Digitized by Google

On a installé un transformateur de 180 à 200 kilowatts tous les 2^{km} sur les tronçons de la voie où les rampes sont égales ou inférieures à 15 pour 100, et tous les kilomètres sur les tronçons où les rampes sont comprises entre 15 et 25 pour 100. La canalisation de contact est établie pour une perte maximum de 12 pour 100 entre deux stations consécutives.

Les locomotives prennent le courant au moyen de deux perches.

Chemin de fer de Varese. — La longueur de cette ligne de chemin de fer est de 40^{km}, dont 32^{km} avec rampes maxima de 45^{mm} par mètre, et 8^{km} en montagne avec courbes nombreuses et rampes variant entre 60^{mm} et 72^{mm} par mètre.

Chaque voiture porte deux moteurs de 70 chevaux.

Le courant triphasé à 6000 volts, 45 périodes par seconde, est amené à une série de transformateurs disposés le long de la voie, et dont les secondaires fournissent le courant à la tension de 500 volts aux deux fils de trolley et aux rails.

Chemin de fer de Lecco-Colico-Sondrio-Chiavenna. — Cette ligne a 106^{km} de longueur; les rampes atteignent 22 pour 100; elle est desservie par une usine située à Morbegno, à 15^{km} de Lecco et à 25^{km} de Sondrio. Le courant triphasé à 21000 volts, produit directement à cette tension par 4 génératrices Schuckert de 1500 kilowatts, à la fréquence de 15 périodes par seconde, est transporté le long de la voie par une ligne formée de trois fils de cuivre nus de $6^{mm},5$ de diamètre, sur isolateurs de porcelaine à 5 cloches, à 12 postes de transformateurs de 450 kilowatts dont les enroulements secondaires fournissent le courant à 3000 volts à la ligne de contact. Celle-ci est constituée par deux fils de cuivre de 8^{mm} de diamètre, placés à la même hauteur, les rails formant troisième conducteur.

Les locomotives sont de deux types, de 300 et de 700 chevaux. La prise de courant sur la ligne de contact est effectuée au moyen de rouleaux d'aluminium ou de bronze phosphoreux de 76^{mm} de diamètre. Les moteurs utilisent directement le courant triphasé à 3000 volts.

Deuxième classe. — La puissance est produite sous une très

Digitized by Google

haute tension, 10000 à 15000 volts par exemple, et est distribuée aux véhicules sous cette tension trop élevée pour l'utilisation directe par les moteurs. Les voitures ou les locomotives portent un ou plusieurs transformateurs qui réduisent cette tension à la valeur la plus convenable pour les moteurs, 1000 à 2000 volts par exemple. C'est le système adopté par la maison Siemens et Halske (1).

L'installation primaire est montée en étoile dont le centre est mis à la terre par mesure de sécurité. La ligne de contact est à trois conducteurs, les rails n'étant pas utilisés dans la distribution. Les trois conducteurs aériens sont disposés latéralement à la voie, dans un même plan vertical; ils sont fixés à des isolateurs d'ébonite portés par la corde verticale d'un arc en fer à U boulonné sur un poteau. Ce dispositif donne une certaine souplesse à la canalisation de contact, tant dans le sens transversal que dans le sens longitudinal. La flèche des fils se trouvant dans un plan vertical influence peu le contact latéral.

La prise mobile est formée de trois archets à cylindre d'aluminium vertical; les tiges de ces archets peuvent osciller autour de trois bras verticaux, ou bien autour d'un même axe vertical.

Ce système convient spécialement aux chemins de fer à grande vitesse ou à trains lourds, la grande puissance étant obtenue avec une intensité modérée au contact avec les fils. On peut du reste améliorer la prise du courant en doublant les contacts mobiles. L'expérience a montré que la prise du courant s'effectue d'autant mieux que la tension est plus élevée.

La disposition des trois conducteurs dans un plan vertical, latéralement à la voie, rend facile l'installation d'un filet protecteur au-dessous de la ligne aux points où cette précaution est jugée utile.

Le montage de *trois conducteurs dans un même plan vertical* a l'inconvénient d'exiger une grande hauteur pour les passages sur rails et pour les tunnels. Ainsi, dans l'installation expérimentale sur la ligne de Marienfelde à Zossen les

(1) *Voyez* Chapitre IX.

Digitized by Google

points d'attache du fil inférieur sont à $5^m,500$ au-dessus des rails, et les trois conducteurs étant distants de 1^m, les points d'attache du conducteur supérieur se trouvent à $7^m,500$ au-dessus des rails.

Le poids mort des véhicules est augmenté du poids des transformateurs. En revanche, les transformateurs sur la ligne sont supprimés ou tout au moins réduits.

III. — *Choix de la fréquence.*

La fréquence la plus appropriée à la traction par moteur à courant polyphasé est déterminée dans chaque cas particulier par les diverses conditions de l'installation.

Une fréquence élevée est avantageuse au point de vue des transformateurs; par contre elle peut donner lieu à une perte de tension importante par impédance et par résistance des rails au courant alternatif. Nous avons déjà signalé l'impédance des deux sections ayant les rails comme conducteur commun.

D'autre part, une faible fréquence réduit le nombre de tours par minute des moteurs et permet, dans certains cas où la vitesse des véhicules n'est pas considérable, de supprimer les transmissions par engrenages en calant directement les moteurs sur les essieux. C'est le cas du chemin de fer de Lecco-Colico-Sondrio-Chiavenna, dont les locomotives ont les vitesses normales de 60^{km} et de 30^{km} par heure, et pour lequel la Maison Ganz a adopté la basse fréquence de 15 périodes par seconde.

Par contre, une fréquence élevée peut être avantageuse pour la traction à très grande vitesse.

Les fréquences usitées actuellement sont comprises entre 50 et 15 périodes par seconde.

Si l'on veut faire l'éclairage par le courant triphasé à basse fréquence, on amortit les battements de la lumière en employant des lampes à incandescence à trois filaments sous la même ampoule dépolie, ou tout au moins en disposant les lampes à incandescence par groupes de trois montées sur les trois sections et renfermées dans le même globe dépoli.

Digitized by Google

IV. — *Démarrage et réglage de la vitesse.*

Le réglage de la vitesse des moteurs d'induction pour la traction peut être obtenu par différentes méthodes dont les principales sont les suivantes :

1° Réglage par rhéostat;

2° Réglage par changement du nombre de pôles du moteur;

3° Réglage par modification du nombre de sections de l'armature du moteur;

4° Réglage en tandem-multiple;

5° Réglage par régulateur de tension, l'armature du moteur étant en court-circuit,

6° Réglage par pôles fixes.

1° *Réglage par rhéostat.* — Un rhéostat monté en série avec l'inducteur réduirait la tension aux bornes du moteur, et par conséquent le champ. Le couple par ampère se trouverait donc diminué, ainsi que le couple maximum au démarrage. Ce procédé, qui est appliqué quelquefois pour la manœuvre des treuils, des ponts roulants, etc., ne convient pas pour la traction.

On ferme l'armature sur un rhéostat par l'intermédiaire de bagues et de balais. On peut obtenir de la sorte un couple élevé au démarrage et à vitesse réduite. Le régulateur est simple. Le rendement est bon à vitesse normale; il n'y a perte de puissance qu'au démarrage et à vitesse réduite. Cette méthode de réglage, très simple, convient donc particulièrement aux chemins de fer et aux tramways dont la vitesse doit être à peu près constante. Si la vitesse était très variable le rendement moyen serait médiocre.

2° *Réglage par changement du nombre de pôles du moteur.* — Ce procédé donne un bon rendement quand il s'agit d'obtenir deux ou trois vitesses déterminées, par exemple pleine vitesse et demi-vitesse. Les connexions avec le régulateur sont assez complexes. L'inducteur doit être enroulé en anneau, ce qui accroît dans une certaine mesure le diamètre extérieur du moteur. L'emploi d'un rhéostat sur l'ar-

Digitized by Google

mature pour le démarrage rendrait le régulateur et les connexions très compliqués. L'armature est donc de préférence en court-circuit, à enroulement en cage d'écureuil ou en anneau formé d'un grand nombre de bobines en court-circuit; il est alors difficile d'obtenir un couple élevé au démarrage.

3° *Réglage par modification du nombre de sections de l'armature du moteur.* — Nous avons vu (Chapitre VI, page 456) que si l'on rend inactive l'une des trois sections de l'armature d'un moteur à courant triphasé, par exemple en soulevant l'un des balais, la vitesse tombe à la moitié de la vitesse normale si le moteur est suffisamment chargé. Ce procédé de réglage de la vitesse a été appliqué par la Maison Siemens et Halske dans ses essais de traction par courant triphasé.

4° *Réglage en tandem-multiple.* — Cette méthode correspond au réglage en série-parallèle des moteurs de tramway à courant continu. La locomotive ou la voiture porte une paire ou deux paires de moteurs à courant polyphasé. Pour la vitesse normale les deux moteurs d'une paire sont connectés en quantité à la ligne de contact. Lorsqu'on veut réduire la vitesse, on connecte à la canalisation l'inducteur de l'un des moteurs dont l'armature, munie de bagues, est alors reliée aux bornes de l'inducteur du second moteur; l'armature de ce dernier est en court-circuit, ou mieux porte des bagues. Au démarrage, les deux moteurs étant ainsi montés *en cascade*, et l'armature du second moteur étant fermée sur un rhéostat, on réduit progressivement la résistance de ce dernier jusqu'à la mise en court-circuit; chaque moteur tourne alors à une vitesse un peu inférieure à la moitié de la vitesse synchronique.

Le rapport de transformation du premier moteur doit être égal ou supérieur à l'unité.

Ce procédé de réglage est fréquemment employé. Il possède les défauts suivants :

1° Le régulateur est compliqué;

2° Le courant fourni par l'armature du premier moteur à l'inducteur du second a une composante en retard de 90° engendrant le champ du second moteur. La puissance du

Digitized by Google

premier moteur, qui agit partiellement comme transformateur, se trouve donc réduite.

On obtient avec ce système de réglage un rendement très bon à vitesse normale, et assez bon à demi-vitesse. Le rendement est moins élevé dans le second cas parce que les moteurs tournent à la moitié de leur vitesse normale, et parce que l'un des moteurs transforme environ la moitié de la puissance qu'il reçoit pour la transmettre au second moteur avec un facteur de puissance notablement inférieur à l'unité.

Les voitures du chemin de fer de Varese portent deux moteurs de 70 chevaux; dans les fortes rampes, qui atteignent 72^{mm} par mètre, les deux moteurs sont montés en cascade.

Le chemin de fer de Lecco-Colico-Sondrio-Chiavenna présente une variante de ce montage. Les locomotives à marchandises, ainsi que les voitures automotrices, sont munies de deux paires de moteurs. Dans les fortes rampes les deux moteurs de chaque paire sont montés en cascade. L'armature des moteurs *secondaires* porte des bagues qui permettent de la fermer sur un rhéostat de démarrage à liquide. Pour la marche à grande vitesse les deux moteurs *primaires* sont seuls reliés à la ligne, les deux moteurs secondaires étant alors inactifs.

5° *Réglage par régulateur de tension.* — Le régulateur de tension donne le dispositif le plus simple. Le moteur n'a pas de bagues. L'armature en court-circuit a une résistance élevée permettant d'obtenir un grand couple au démarrage. On fait varier la vitesse en modifiant la tension aux bornes du moteur au moyen d'un transformateur à rapport de transformation variable. La dispersion magnétique réduit le facteur de puissance.

Ce mode de réglage présente plusieurs inconvénients :

1° La grande résistance de l'armature réduit le rendement du moteur même à vitesse normale et à pleine charge.

2° Le moteur exige au démarrage, pour un couple donné, un courant au moins double de celui qu'il absorberait dans le cas du réglage par rhéostat. Le couple de démarrage d'un moteur de chemin de fer devant être de deux à trois fois le couple en marche normale, le courant de démarrage avec le

Digitized by Google

régulateur de tension doit avoir une intensité d'au moins quatre à six fois le courant en marche normale. Ce courant considérable, à faible facteur de puissance, donne lieu à une chute de tension importante dans les génératrices, les canalisations et les transformateurs; le couple du moteur diminuant comme le carré de la tension aux bornes, il peut arriver que le moteur ne démarre pas. Cette méthode ne convient donc pas à la plupart des chemins de fer, ni aux diverses applications qui exigent un fort couple de démarrage.

6° *Réglage par pôles fixes.* — Les ateliers d'Œrlikon ont appliqué au chemin de fer de la Jungfrau un dispositif qui permet de régler la vitesse des trains à la descente. Une petite batterie d'accumulateurs, ou mieux une petite dynamo actionnée par l'axe du moteur, envoie un courant continu dans l'enroulement de l'inducteur du moteur, et crée par suite une série de pôles fixes. L'armature étant en court-circuit, ou fermée sur un rhéostat, engendre en tournant un courant triphasé qui fait frein. On règle l'intensité du champ, et par suite la vitesse, au moyen d'un rhéostat monté en série avec l'inducteur. Ce procédé rend le freinage par le moteur à la descente indépendant du contact des trolleys avec la canalisation. On arrive de la sorte à réduire la vitesse à la descente à la moitié de la vitesse normale.

Les moteurs pour traction doivent être établis de façon à pouvoir développer au démarrage un couple égal à deux ou trois fois le couple normal.

Si les moteurs sont alimentés par le secondaire d'un transformateur porté par le véhicule, on peut accroître le couple au démarrage en élevant momentanément la tension aux bornes du moteur en employant un transformateur à rapport de transformation variable.

On obtient un résultat analogue par le procédé plus simple adopté par la maison Siemens et Halske, consistant à grouper, au moyen d'un commutateur, les trois sections de l'inducteur du moteur normalement en étoile, et au démarrage en triangle; on triple de la sorte le couple de démarrage.

Digitized by Google

CHAPITRE IX.

DESCRIPTIONS D'INSTALLATIONS POUR LE TRANSPORT ET LA DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE PAR COURANTS POLYPHASÉS.

§ I. — Transport d'énergie de Lauffen a l'exposition de Francfort, en 1891.

Cette installation a été étudiée et exécutée en commun par la *Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft,* de Berlin, et les ateliers d'Œrlikon.

La station génératrice était installée dans une fabrique hydraulique de ciment Portland, à Lauffen-sur-Neckar (Wurtemberg). L'usine devait être utilisée ultérieurement pour la production de l'énergie à distribuer dans la ville d'Heilbronn.

Une turbine de 300 chevaux, à axe vertical, commandait au moyen d'une paire de roues d'angle une génératrice Brown de 200 kilowatts, à courant triphasé, faisant 150 tours par minute, dont nous avons parlé plus haut (p. 112 et suiv.). Une petite excitatrice fournissait le courant d'excitation.

Au départ, le courant était amené à la tension convenable à l'aide d'un transformateur élévateur de 200 kilowatts. A Francfort, trois transformateurs réduisaient la tension aux bornes à 100 volts. Le courant de basse tension alimentait 1000 lampes à incandescence, ainsi que des moteurs.

La longueur de la ligne de Lauffen à Francfort était d'environ 175^{km}. La ligne était formée de trois fils de cuivre nus de 4^{mm} de diamètre ayant un développement total de 530^{km}, et pesant ensemble 60000^{kg} environ. Ces conducteurs étaient supportés par 3000 poteaux de bois de 8^{m} de longueur, espacés d'environ 60^{m}.

Nous avons déjà représenté (*fig.* 115 et 116) les deux types

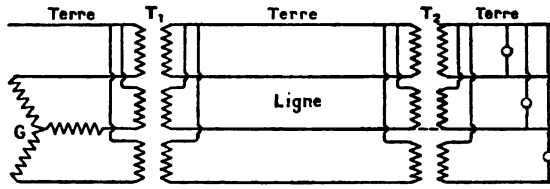
Digitized by Google

d'isolateurs à huile employés dans cette transmission d'énergie.

La disposition adoptée pour les supports est représentée par la figure 127 (p. 246). L'un des isolateurs est tirefonné sur le sommet du poteau : les deux autres sont fixés aux extrémités d'une traverse de bois horizontale, boulonnée sur le poteau. Les trois fils sont disposés suivant les arêtes d'un prisme triangulaire équilatéral. La hauteur minimum des fils au-dessus du sol est 5^m.

La figure 206 représente le schéma du montage de la géné-

Fig. 206.



ratrice G, du transformateur élévateur T_1, de la ligne, et des transformateurs réducteurs T_2. Il n'y a aucun interrupteur sur le courant de haute tension. Au départ, les fils de 4^{mm} de diamètre sont remplacés par des faisceaux de fils de cuivre de $0^{mm},15$ de diamètre et de $2^m,50$ de longueur, formant coupe-circuit, prévus pour une tension de 20000 à 30000 volts; ces fils étaient fixés entre deux poteaux distants d'environ $2^m,50$, ayant pour but de soustraire ces fils fins à la traction des conducteurs de la ligne.

Par mesure de sécurité pour la vie des personnes, dans le cas où l'un des fils de la ligne viendrait à se rompre, et encore en prévision du cas où un contact se produirait entre un fil à haute tension et un fil à basse tension, on avait mis à la terre les centres des étoiles à haute et à basse tension des transformateurs au départ et à l'arrivée. Si une terre venait à se former, le coupe-circuit correspondant sautait aussitôt.

Il y avait en outre au départ de chaque fil de ligne un relais ayant pour but de couper l'excitation de la génératrice si le courant venait à dépasser une limite supérieure déterminée, par exemple dans le cas de formation d'une terre, ou

Digitized by Google

une limite inférieure correspondant à une charge trop faible dans une section pouvant donner naissance à une tension dangereuse.

D'après les mesures effectuées, on a pu transmettre dans ces conditions une puissance d'environ 197 chevaux sur l'arbre de la machine à courant triphasé, avec un rendement d'environ 74 pour 100, la puissance reçue étant mesurée aux bornes secondaires des transformateurs réducteurs.

La différence de potentiel fournie par chacune des trois sections de la génératrice, montées en étoile, a varié entre 50 et 56 volts. Le rapport des nombres de spires secondaires et de spires primaires du transformateur élévateur était égal à 160. La tension de chaque section secondaire du transformateur élévateur, entre une borne et le centre de l'étoile, était donc dans les deux cas

$$50 \times 160 = 8000 \text{ volts},$$
$$56 \times 160 = 8980 \text{ volts}.$$

La tension entre deux fils de ligne était par conséquent dans les deux cas :

$$8000 \times \sqrt{3} = 13850 \text{ volts environ},$$
$$8980 \times \sqrt{3} = 15450 \text{ volts environ}.$$

§ II. — Installation de Budapest.

Cette installation a été faite par la maison Schuckert. Le transport d'énergie a lieu au moyen de courant diphasé, tandis que la distribution est faite au moyen de courant continu. L'usine génératrice est située à environ $3^{km},5$ des sous-stations. Elle comportait au début deux machines à courant diphasé de 66 kilowatts, et trois machines de 300 à 335 kilowatts. La tension entre deux bornes d'une même section varie entre 1800 et 1900 volts. La fréquence est 26 périodes par seconde.

Ces machines, sur lesquelles nous avons déjà fourni quelques indications, sont formées d'un anneau Gramme à

Digitized by Google

enroulement continu dont les points correspondant à des différences de phases d'un quart de période sont reliés à quatre bagues métalliques sur lesquelles des balais récoltent le courant diphasé à 1800-1900 volts. L'induit tourne à l'intérieur d'un inducteur dont les noyaux d'acier sont réunis extérieurement par une culasse polygonale ou circulaire également d'acier.

Les génératrices de 66 kilowatts, type WAz 100, ont huit pôles inducteurs; elles fournissent 18,5 ampères à une borne, et font 400 tours par minute; elles sont excitées chacune par une excitatrice de 2,4 kilowatts à 220 volts, manchonnée directement sur l'arbre de la génératrice. Ces machines sont actionnées par deux locomobiles compound.

Les génératrices de 300 à 335 kilowatts, type WAz 300, ont vingt-huit pôles inducteurs. Elles sont accouplées directement chacune avec une machine à vapeur verticale, à triple expansion, recevant la vapeur à la pression effective de 10^{kg} par centimètre carré, et faisant 112 tours par minute. L'autre extrémité de l'arbre de la machine à vapeur actionne par une paire de roues dentées une excitatrice de 10 kilowatts faisant 450 tours par minute. On contrôle le synchronisme, avant d'accoupler les machines, au moyen d'un voltmètre. Le tableau des génératrices porte quatre barres collectrices.

La canalisation primaire souterraine est formée de câbles à deux conducteurs concentriques. Elle dessert trois sous-stations transformatrices. Celles-ci renferment des transformateurs de courant diphasé en courant continu, de 120 et de 240 kilowatts. Ces transformateurs se composent d'un moteur synchrone, de construction analogue à celle des génératrices, recevant directement le courant diphasé à 1800 volts, et manchonné directement avec une dynamo à courant continu. Celle-ci alimente le réseau de distribution à trois fils et charge des batteries d'accumulateurs. La tension supplémentaire exigée par la charge des accumulateurs est obtenue au moyen de survolteurs. La mise en marche des transformateurs rotatifs est effectuée en se servant des dynamos comme moteurs alimentés par les accumulateurs; lorsque les moteurs synchrones ont atteint le synchronisme, on les ferme sur la canalisation à courant diphasé.

Digitized by Google

§ III. — Distribution d'énergie dans les gares de Dresde.

Cette installation, qui a été faite par la maison Siemens et Halske, fournit l'éclairage aux diverses gares de Dresde, et l'énergie mécanique aux ateliers de réparation, aux appareils de levage, aux pompes, etc.

L'usine génératrice comprend quatre machines à courant triphasé de 220 kilowatts et une machine de 440 kilowatts. L'induit fixe a un diamètre intérieur de $3^{m},90$ environ et porte un enroulement en barres de cuivre. L'inducteur mobile a soixante pôles, et est calé directement sur l'arbre d'une machine à vapeur compound-tandem faisant 100 tours par minute. Chaque machine porte calée à l'extrémité de son arbre une excitatrice à pôles intérieurs. Les cinq excitatrices sont accouplées en quantité sur les deux barres d'excitation du tableau. L'éclairage de l'usine est pris sur ces barres, de telle sorte qu'il est indépendant d'un accident pouvant survenir sur la ligne.

Le courant à 115 volts des génératrices arrive au tableau des machines, puis passe par une batterie de transformateurs à courant triphasé de 100 kilowatts, élevant la tension à 3118 volts.

La ligne se compose de trois fils de cuivre distants de 45^{cm}, et placés l'un au-dessous de l'autre. Les deux conducteurs extrêmes sont plus gros que celui du milieu. Les lampes sont toutes branchées sur les deux fils extrêmes par l'intermédiaire de transformateurs à courant alternatif de 10 kilowatts.

La ligne est calculée pour une perte maximum de 2 pour 100 dans les conducteurs principaux, et de 1 pour 100 dans les dérivations.

§ IV. — Installation de la fonderie de Mulhouse.

La fonderie de Mulhouse comporte trois travées principales d'environ 75^{m} de longueur sur 15^{m} de largeur. La travée centrale est desservie par deux ponts roulants de 20 tonnes,

Digitized by Google

et chacune de deux travées extrêmes par deux ponts roulants de 10 tonnes.

L'usine génératrice comprend, outre les dynamos à courant continu pour l'éclairage des ateliers, deux machines à courant triphasé de 150 kilowatts. Ces génératrices ont été décrites précédemment. L'une a un induit fixe dont l'enroulement en tambour est constitué par des barres; à l'intérieur de cet induit tourne un inducteur à trente pôles, excité par une bobine unique, et calé directement sur l'arbre d'une machine à vapeur verticale à triple expansion, à 200 tours par minute. La seconde génératrice est à inducteur unipolaire et à induit unique. La pièce tournante portant vingt pôles d'acier est calée sur l'arbre d'une machine à vapeur verticale, à triple expansion, faisant 150 tours par minute.

La fréquence est égale à 50 périodes par seconde.

Ces machines produisent une tension de 190 à 200 volts aux bornes. Quoique leurs vitesses angulaires et leurs modes de construction soient différents, ces machines s'accouplent parfaitement.

Le tableau des génératrices est relié au tableau de distribution de la fonderie par un câble armé, à trois conducteurs concentriques, de $3 \times 300^{mm^2}$.

Les ponts roulants, fournis par les ateliers d'Œrlikon, portent chacun trois moteurs à courant triphasé.

Les ponts roulants de 20 tonnes comportent :

Un moteur de 18 chevaux, faisant 970 tours par minute et actionnant le treuil;

Un moteur de 6 chevaux à deux vitesses : 725 et 1450 tours par minute, pour la translation du pont;

Un moteur de 3 chevaux, à 1450 tours par minute, pour la translation du treuil.

Les ponts de 10 tonnes portent :

Un moteur de 9 chevaux, à 970 tours par minute, actionnant le treuil;

Un moteur de 3 chevaux, à 1450 et 2900 tours par minute, pour la translation du pont;

Un moteur de 1,5 cheval, à 1450 tours par minute, pour la translation du treuil.

La mise en marche des moteurs des treuils s'effectue au

Digitized by Google

moyen d'un rhéostat à touches monté en série sur l'inducteur. La mise en marche des deux autres moteurs se fait directement.

L'installation comporte encore :

Deux moteurs de 35 chevaux qui actionnent directement deux ventilateurs Farcot, à 1450 tours par minute, desservant les cubilots;

Un moteur de 20 chevaux, à 950 tours par minute, attaquant une transmission;

Un moteur de 12 chevaux pour le monte-charge des cubilots;

Une grue roulante et pivotante sert à la manœuvre des châssis à l'extérieur de la fonderie. Un moteur de $7^{chx},5$, à 1420 tours par minute, actionne le treuil, et un moteur de 4 chevaux, à 1400 tours par minute, opère la translation de la grue. Le mouvement de rotation de la volée, montée sur billes, s'effectue à la main. Afin d'éviter la mise d'un pôle à la terre, l'auteur a adopté un triple trolley prenant le courant triphasé sur trois fils de cuivre de 6^{mm} de diamètre, espacés de $0^{m},30$, et portés par des fils transversaux d'acier. La mise en marche des deux moteurs s'effectue au moyen de rhéostats reliés aux balais des induits, et dont les cadrans portent, calés sur la même manivelle, les commutateurs-interrupteurs pour l'arrêt et le changement de marche.

§ V. — Installation des chutes du Niagara.

L'usine génératrice a une puissance de 50000 chevaux sur l'arbre des turbines. L'eau est conduite à l'usine par un canal d'amenée. Les turbines sont installées au fond d'un puits rectangulaire, d'environ 54^{m} de profondeur, taillé dans le roc. Un tuyau vertical d'acier, logé dans le puits, amène l'eau à chaque turbine. L'arbre vertical des turbines est constitué, pour la majeure partie, par un tuyau d'acier. Au-dessous de la génératrice se trouve un palier de butée. Les turbines, à axe vertical, fonctionnent sous une chute d'environ 50^{m}. Elles développent 5000 chevaux à 250 tours par minute. Ces turbines centrifuges, du type Fourneyron, sont doubles. Dans

Digitized by Google

le but d'équilibrer le poids de la turbine, de l'arbre et de l'inducteur mobile de la génératrice, le plateau de la roue supérieure reçoit la pression de l'eau sur sa surface inférieure. L'arbre vertical de chaque moteur est manchonné avec l'arbre d'une génératrice de 5000 chevaux.

Ces génératrices de courant diphasé ont un induit intérieur fixe et un inducteur extérieur mobile. Celui-ci se compose d'un anneau d'acier portant douze pôles intérieurs munis de bobines excitatrices; cet inducteur est porté par une étoile calée à l'extrémité supérieure de l'arbre vertical de la génératrice. Cet arbre porte encore deux bagues de bronze sur lesquelles frottent deux balais amenant le courant d'excitation. L'induit fixe, intérieur, est formé d'un anneau de tôle dans les cannelures duquel est logé l'enroulement formé de barres de cuivre. Ces machines, sur lesquelles nous avons donné quelques indications (p. 119 à 121), fournissent un courant diphasé de 2300 volts et de 2×775 ampères, à la fréquence de 25 périodes par seconde. La vitesse du champ inducteur est d'environ 40^{m} par seconde.

Au début, l'usine génératrice ne comprenait que trois unités de 5000 chevaux; depuis elle a été augmentée par l'installation de sept nouvelles unités.

Une grande partie de l'énergie produite est consommée par les usines qui se sont installées dans les environs de la station centrale. L'utilisation est effectuée directement comme courant diphasé ou comme courant alternatif; ou bien encore des convertisseurs transforment le courant diphasé en courant continu.

Une partie de l'énergie électrique engendrée est transportée et distribuée dans la ville de Buffalo. A cet effet, le courant diphasé de 2300 volts environ est conduit à une batterie de transformateurs de 1250 chevaux, à courant alternatif montés suivant le système Scott, et fournissant à leurs bornes secondaires un courant triphasé de 11000 volts. Cette ligne, que nous avons décrite à propos de l'étude des canalisations, a une longueur d'environ 43^{km}. Elle était prévue pour quatre séries de trois câbles de 175^{mm^2}. Elle est aérienne, sauf sur une longueur d'environ 1200^{m} où elle est formée de câbles souterrains de 175^{mm^2} isolés au caoutchouc.

Digitized by Google

En 1901 on a porté la tension, au départ de cette ligne, à 22000 volts : la ligne double, formée de six câbles de 175^{mm^2}, est capable de transporter 20000 chevaux. Aux abords de Buffalo la ligne aboutit à une sous-station renfermant sept transformateurs de 2250 kilowatts dont l'un est en réserve. Ces transformateurs forment deux groupes de trois et abaissent la tension à 11000 volts pour la distribution dans la ville.

L'énergie est utilisée à Buffalo soit sous forme de courant alternatif pour l'éclairage, soit sous forme de courant continu pour les tramways électriques, obtenu au moyen de convertisseurs.

L'usine des chutes du Niagara dessert, en outre des distributions d'éclairage et de diverses lignes de tramways, une série d'usines électrochimiques produisant de l'aluminium, du carborundum, du chlorate de potasse, etc.

On construit sur l'autre rive du canal d'amenée une seconde usine qui comprendra onze unités de 5000 chevaux à 250 tours par minute.

§ VI. — Installation de Regla-Pachuca (Mexique).

Cette installation, dont le but principal est de distribuer l'énergie aux moteurs et aux lampes des mines d'argent de Pachuca, emprunte sa puissance motrice à la rivière Regla.

A 300^m de la prise se trouvent le réservoir et les vannes de tête qui commandent un canal de $1^m,25 \times 1^m,25$ de section et de 2400^m de longueur, avec une pente de 0,4 pour 100 donnant une différence de niveau de $9^m,60$ entre les deux extrémités.

Un tuyau d'acier de 760^{mm} de diamètre et de 660^m de longueur, muni d'un reniflard, amène l'eau au *receiver* de l'usine génératrice. Celui-ci se compose d'un tuyau de $1^m,016$ de diamètre et de $22^m,50$ de longueur, en tôle de 19^{mm} d'épaisseur. Il est muni d'un reniflard à soupape Cornwall, et porte à sa partie inférieure sept turbines coniques inclinées à 30° sur l'horizontale, dans un plan vertical passant par l'axe du *receiver*.

Digitized by Google

Au-dessous de ce tuyau sont installées cinq roues Pelton d'environ $1^{m},092$ de diamètre, développant 600 chevaux sous une chute de 250^{m}. Ces turbines font 600 tours par minute, et actionnent chacune, par l'intermédiaire d'un manchon isolant, une machine à courant triphasé à douze pôles, de la *General Electric Company,* fournissant une tension de 700 volts aux bornes.

Deux petites roues Pelton de 610^{mm} de diamètre, faisant 1300 tours par minute, actionnent directement deux excitatrices de 25 kilowatts, dont chacune suffit à l'excitation de cinq génératrices et à l'éclairage de l'usine.

Le réglage de la vitesse des turbines s'obtient en faisant varier l'inclinaison de la buse de l'injecteur.

Les roues Pelton sont installées dans un couloir à la partie inférieure duquel se trouve une fosse par laquelle s'écoule l'eau sortant des turbines, et à la partie supérieure duquel est monté le *receiver*. Ce local est complètement séparé de la salle des machines électriques; le mur de séparation est traversé par les arbres des sept turbines.

Le tableau, de marbre, a onze panneaux. A l'une des extrémités deux panneaux portent les appareils des excitatrices ainsi que deux barres de cuivre qui se prolongent sur les cinq panneaux suivants, réservés aux génératrices. Trois barres de cuivre s'étendant sur ces panneaux recueillent le courant triphasé; chacun de ces panneaux porte trois coupe-circuit à tube de porcelaine, un interrupteur triple, un ampèremètre, un voltmètre et un indicateur de phase. Les trois barres collectrices se prolongent sur les panneaux suivants. Le huitième panneau est réservé au départ de la ligne; il porte un interrupteur triple, trois ampèremètres et trois choking-coils formées de 75^{m} de fil de cuivre isolé de $9^{mm},27$ de diamètre, enroulé en bobines d'environ 380^{mm} de diamètre. L'une des extrémités de ces bobines est reliée à l'interrupteur et l'autre à l'un des fils de ligne. Ces bobines font partie d'un parafoudre formé de trois séries de trente-deux sphères d'environ 25^{mm} de diamètre, espacées de $0^{mm},8$. Ces sphères, de métal s'opposant à la formation d'arc, sont vissées sur une plaque de marbre. La première sphère de chaque série est reliée à la borne de départ d'un fil de ligne; la der-

Digitized by Google

nière est connectée à la terre par l'intermédiaire d'une résistance de charbon de 12 ohms, ayant pour but d'éviter un court-circuit.

Les trois panneaux extrêmes portent les interrupteurs primaires et secondaires des transformateurs élévateurs.

On a installé six transformateurs à courant alternatif de 200 kilowatts, dans la salle des machines. Ces transformateurs sont montés par paire entre deux des trois barres; les trois paires de transformateurs sont montées en triangle. Ces transformateurs sont refroidis par deux ventilateurs actionnés directement par deux moteurs recevant le courant des excitatrices.

Les transformateurs élèvent la tension à 10000 volts.

La distance de l'usine génératrice à Pachuca est d'environ $26^{km},5$. La ligne est formée de trois fils de cuivre de 67^{mm^2}, portés par des isolateurs de porcelaine dont les broches de bois sont fixées sur une traverse horizontale. Les poteaux ont une longueur de $7^{m},50$ et sont maçonnés sur une hauteur de $1^{m},20$.

Les trois fils sont montés dans le même plan horizontal.

Deux de ces conducteurs sont fixés aux extrémités des traverses; le troisième est en zigzag, passant à droite d'un poteau, puis à gauche du poteau suivant, et ainsi de suite.

A la mine, située à $23^{km},2$ de l'usine génératrice, trois transformateurs à courant alternatif montés en triangle réduisent la tension à 1100 volts. Quatre moteurs d'induction de 75 chevaux actionnent les pompes installées dans la mine.

La ville minière de Pachuca, d'une population de 80000 habitants, possède une série de moteurs. A Pachuca la ligne aboutit à une sous-station qui renferme un tableau portant entre autres appareils des compteurs d'énergie, ainsi que des transformateurs isolés à l'huile. En outre, une ligne de 8^{km} à 10000 volts transporte 150 kilowatts à San Rafael.

§ VII. — Transport d'énergie a Hartford (New-England).

Cette installation a été faite par la *Westinghouse Electric and Manufacturing Company*.

Digitized by Google

La rivière Farmington alimente quatre turbines de 400 chevaux, à axe horizontal. Chaque paire de turbines commande par courroie une génératrice de courant diphasé de 600 kilowatts, à 500 volts, faisant 325 tours par minute. L'induit a un noyau à cannelures dans lesquelles est logé l'enroulement formé de barres de cuivre; cet induit tourne à l'intérieur d'un inducteur à 22 pôles. La fréquence est 60 périodes par seconde. Les machines travaillent en quantité. L'énergie produite par chaque génératrice est enregistrée par deux compteurs Schallenberger. Le courant total de chaque section diphasée passe par le primaire d'un transformateur dont le secondaire alimente le compteur.

Quatre transformateurs de 300 kilowatts, deux à deux en quantité, et montés suivant le système Scott, transforment le courant diphasé de 500 volts en courant triphasé de 10000 volts. Il n'y a aucun interrupteur sur le courant de 10000 volts.

La ville de Hartford est à une distance d'environ $17^{km},3$ de l'usine génératrice. La ligne est formée de six fils de cuivre de $8^{mm},25$ de diamètre, montés deux par deux en quantité, et portés par des isolateurs de verre à double cloche. Avant de pénétrer dans la ville, la ligne devient souterraine sur une longueur de 900^{m} et est alors formée de trois câbles de 107^{mm^2} de section. La ligne est protégée par des parafoudres Wurtz et par des choke-coils.

A Hartford, le courant triphasé est transformé en courant diphasé de 2400 volts desservant l'éclairage par courant alternatif, ainsi qu'un moteur synchrone de 600 kilowatts à courant diphasé, à 2400 volts, et un convertisseur rotatif de 250 kilowatts. Deux transformateurs à courant alternatif réduisent la tension du courant diphasé; le courant secondaire est conduit aux quatre bagues du convertisseur reliées à l'enroulement qui est formé de barres de cuivre logées dans les cannelures du noyau. L'inducteur a 14 pôles, la fréquence étant 60 périodes par seconde. Le démarrage est effectué au moyen d'un petit moteur asynchrone à induit en cage d'écureuil. Le convertisseur alimente un réseau à trois fils et charge des accumulateurs. La tension aux balais du collecteur devant pouvoir varier entre 230 et 360 volts, deux commutateurs permettent de faire varier le nombre de spires primaires des deux trans-

Digitized by Google

formateurs. De cette façon, ces commutateurs opèrent sur des courants d'intensité modérée. Pour équilibrer les deux *ponts* du réseau à trois fils, on a employé le système Lamme, consistant à relier le fil neutre aux milieux des deux enroulements secondaires des deux transformateurs.

§ VIII. — Transport d'énergie de la rivière Ogden a Salt Lake City.

Cette installation, qui a été confiée à la *General Electric Company*, en septembre 1896, par la *Pioneer Electric Company*, est prévue pour l'utilisation finale de 10000 chevaux, et de 5000 chevaux au début.

En barrant la rivière Ogden, on a créé un réservoir situé à environ $9^{km},6$ de l'usine génératrice. Un tuyau de bois de $1^{m},80$ de diamètre intérieur, et $8^{km},1$ de longueur, présentant une pente de 2 pour 1000, laquelle correspond à la perte de charge admise, se continue par un tuyau de tôle d'acier, incliné, de $1^{m},53$ de diamètre et de 1400^{m} de longueur. A une trentaine de mètres de l'usine, ce tuyau se divise en deux branches de $1^{m},37$ de diamètre aboutissant à deux *receivers* de $1^{m},50$ de diamètre placés de part et d'autre de l'usine (*fig.* 207). Chaque *receiver* porte six coudes dont cinq de 760^{mm} et un de 254^{mm} de diamètre, desservant les turbines. L'installation définitive comprendra deux séries de cinq génératrices et deux excitatrices, les deux groupes de six machines étant disposés symétriquement par rapport à l'axe de l'usine. La première installation comportait cinq groupes générateurs et deux excitatrices.

La différence de niveau entre la surface du réservoir plein et l'axe des receivers est 134^{m}. Les cinq turbines Knight fournissent chacune 1100 chevaux sur l'arbre, à 300 tours par minute. Leur roue, de bronze, a $1^{m},50$ de diamètre et est munie de 45 augets venus de fonte. Le distributeur a six ouvertures que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté. L'arbre porte deux volants de $1^{m},78$ de diamètre, pesant chacun deux tonnes environ.

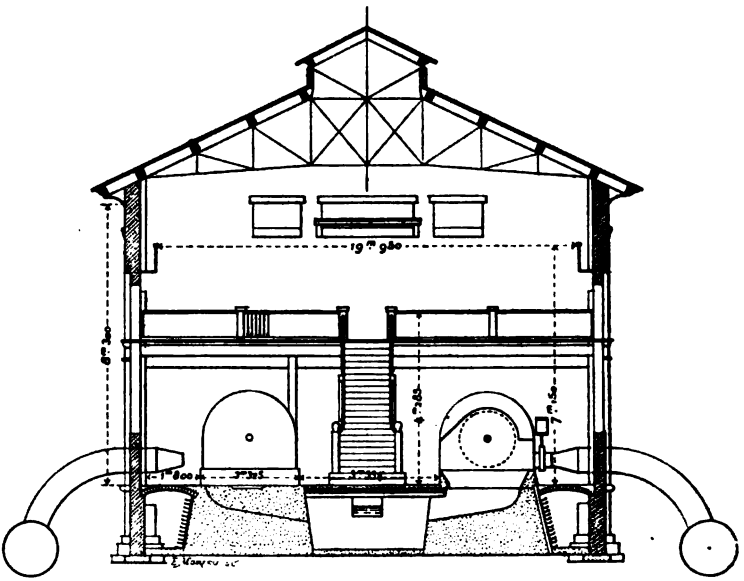
Les génératrices de courant triphasé ont un induit mobile

Digitized by Google

et un inducteur à 24 pôles; elles produisent 750 kilowatts à 2300 volts; l'induit est calé directement sur l'arbre de la turbine. La fréquence est 60 périodes par seconde.

Deux excitatrices de 100 kilowatts, à six pôles, sont actionnées chacune directement par une turbine de 135 chevaux, faisant 550 tours par minute. Chacune de ces dynamos est

Fig. 207.



capable d'exciter les dix génératrices, et peut être branchée sur l'un quelconque des *receivers*.

Du tableau des génératrices, placé sur une plate-forme à l'une des extrémités de l'usine, le courant de 2300 volts passe à un second tableau situé au-dessus du premier. De là une partie de l'énergie est distribuée dans les environs, à la tension de 2300 volts; le reste est transporté à Salt Lake City.

Une batterie de neuf transformateurs à courant alternatif de 250 kilowatts, formant trois séries de trois transformateurs en parallèle, montées en triangle, élève la tension de 2300 à 16100 volts. Ces transformateurs sont refroidis au moyen

Digitized by Google

de deux ventilateurs actionnés par deux moteurs de $2^{chx},5$ alimentés par les excitatrices.

La ligne a une longueur de 61^{km}; elle est formée de deux circuits en quantité, comprenant ensemble six fils de cuivre de 42^{mm^2} de section, montés sur deux traverses horizontales portées par des poteaux de cèdre. Cette ligne est capable de transmettre 3000 chevaux à Salt Lake City. La tension à l'arrivée est égale à 13800 volts. Là une batterie de neuf transformateurs abaisse la tension du courant triphasé à 2300 volts.

On a prévu, pour augmenter au besoin la puissance de la ligne, de porter la tension à 27000 volts environ en montant en étoile les secondaires des transformateurs-élévateurs.

L'essai de cette installation a eu lieu le 11 octobre 1897. On a relié les deux lignes en série, de telle sorte que la longueur de chaque conducteur était égale à environ 122^{km}, la ligne allant à Salt Lake City pour revenir à Ogden. La tension a été portée à 27800 volts et l'on a transmis 1300 chevaux électriques avec une perte de 3 pour 100 dans la ligne.

§ IX. — Transport d'énergie électrique a Fresno (Californie).

Cette installation utilise une chute de 423^m. Le canal d'amenée est formé d'un caisson de bois de 1200^m de longueur ayant une pente de 3 pour 1000, qui se continue par une tranchée de 700^m de longueur, dont la pente est 1 pour 1000, sauf sur une section où la disposition des lieux a obligé à réduire cette pente à 0,7 pour 1000. Ce canal est établi pour un débit normal de $1^{m^3},9$ par seconde, et aboutit à un réservoir de capacité suffisante pour assurer le service de l'usine, à pleine charge, pendant 5 à 6 jours. De ce réservoir part un tuyau de tôle de 610^{mm} de diamètre et de 546^m de longueur, prolongé par 660^m de tuyau de 508^{mm} de diamètre, soudé à recouvrement, avec joints de plomb dans la partie supérieure, et avec joints de caoutchouc à la base de la conduite. Ce tuyau aboutit à un *receiver* de 762^{mm} de diamètre et de $17^m,10$ de longueur.

Digitized by Google

L'usine comporte trois roues Pelton de $1^{m},45$ de diamètre extérieur, portant 27 augets boulonnés, et faisant 600 tours par minute. Chaque moteur a un volant de $1^{m},525$ de diamètre, pesant 1370^{kg}, et portant à sa périphérie une frette d'acier coulé de 50^{mm} d'épaisseur. Ces turbines actionnent directement trois machines à courant triphasé de 350 kilowatts, produisant 700 volts à 600 tours par minute. Ces génératrices, fournies par la *General Electric Company*, sont à induit mobile et à inducteur multipolaire extérieur.

Deux petites turbines actionnent deux excitatrices de 12,5 kilowatts dont chacune suffit à l'excitation des génératrices.

Une batterie de neuf transformateurs de 125 kilowatts, refroidis par un ventilateur, élève la tension à 11 200 volts.

La ligne est double, et formée de six fils de cuivre de 27^{mm^2} de section. Chaque conducteur est relié à une bobine plate formée de 45^{m} de ce même fil isolé, d'un diamètre d'environ 380^{mm}. L'effet produit par l'inductance de ces bobines, pour la fréquence de 60 périodes par seconde, est inappréciable. Les autres extrémités de ces six bobines disposées perpendiculairement au tableau sont reliées aux départs des lignes sur le tableau. Les extrémités de ces bobines reliées aux fils de ligne sont connectées également à six parafoudres Wirt, constitués par des cylindres de métal s'opposant à la formation d'arc, espacés de $0^{mm},8$ et montés sur marbre. Chaque parafoudre est relié à la terre au moyen d'un ruban de cuivre de 25^{mm} de largeur et de $0^{mm},8$ d'épaisseur.

La ligne a une longueur de 56^{km}. Les fils sont portés par des isolateurs à triple cloche montés sur deux traverses fixées sur des poteaux de bois équarris. Une petite traverse inférieure porte les deux conducteurs du téléphone. Sur une partie du trajet de la ligne les poteaux reçoivent une quatrième traverse pour les conducteurs de service de la Compagnie. Les trois fils de chaque ligne sont transposés tous les quarante poteaux, soit tous les 1600^{m}. Les fils téléphoniques sont alternés tous les cinq poteaux. Le téléphone fonctionne très bien, est très tranquille, malgré la distance de 56^{km} et la haute tension de 11 200 volts.

A Fresno, le tableau porte les interrupteurs à haute tension,

Digitized by Google

manœuvrés à distance par des tiges de bambou, et desservant trois séries de transformateurs-réducteurs refroidis au moyen d'un ventilateur mû par un moteur d'induction de 5 chevaux. Cette sous-station renferme :

1° Trois transformateurs de 125 kilowatts fournissant un courant triphasé de 115 volts au réseau à trois fils des lampes à incandescence;

2° Trois transformateurs de 40 kilowatts produisant un courant triphasé de 1000 volts pour le County Hospital et les localités voisines, entre autres Chinatown;

3° Trois transformateurs de 75 kilowatts donnant un courant de 1000 volts pour les moteurs d'induction et pour l'éclairage à arc, à haute tension. L'éclairage à arc est obtenu par des moteurs d'induction, accouplés directement à des machines Brush de 80 lampes de 2000 bougies, faisant 700 tours par minute. Un moteur synchrone de 150 kilowatts actionne un moulin.

§ X. — Installation de Bakersfield (Californie).

La puissance motrice est empruntée à la rivière Kern. L'eau est conduite, sur une longueur de 2630^{m}, par un canal de bois, de $2^{m},40$ de largeur et de $1^{m},80$ de profondeur, ayant une pente d'environ 1^{m} par kilomètre donnant à l'eau une vitesse de $1^{m},80$ par seconde, ce qui correspond à un débit de $7^{m^3},78$ par seconde. Dans ces conditions, la puissance brute de la chute est de 6000 chevaux.

Le sautage de la roche a exigé environ 15 tonnes de dynamite.

Les parois du canal sont formées de deux cloisons de planches entre lesquelles on a interposé un carton goudronné appliqué avec de l'asphalte fondu aux joints des planches, afin d'assurer l'étanchéité. Ce canal est muni d'une bonde pour l'évacuation du sable, et d'une série de vannes dont l'une est mue électriquement de l'usine en cas d'accident. Quatre cabines téléphoniques, communiquant entre elles et avec l'usine, sont réparties sur le trajet du canal.

Afin d'éviter les accidents, on a fait ébouler, avant la con-

Digitized by Google

struction, les roches menaçant de se détacher du flanc de la montagne.

A l'extrémité aval du canal, on a installé un niveau d'eau visible de l'usine à l'œil nu le jour. Pour la nuit des lampes à incandescence blanches sont fixées tous les $0^m,30$, tandis que l'index mobile porte une lampe bleue.

De ce point, l'eau est conduite à l'usine par un tuyau de tôle de $1^m,68$ de diamètre intérieur, aboutissant à un *receiver* de 18^m de longueur et de $1^m,68$ de diamètre, en tôle d'acier de 8^{mm} d'épaisseur. La conduite est peinte et recouverte de terre.

La tête d'eau maximum est égale à 61^m. Le *receiver* porte une chambre à air de $0^m,84$ de diamètre et de $4^m,80$ de longueur, ainsi qu'une soupape de sûreté de 150^{mm} de diamètre. Il est muni de trois tubulures reliées aux injecteurs des turbines.

Les moteurs hydrauliques sont formés chacun de deux turbines Girard, à axe horizontal, de $1^m,12$ de diamètre et faisant 257 tours par minute. Les deux turbines sont manchonnées ensemble et avec une génératrice.

Le volant de chaque récepteur hydraulique commande par courroie une excitatrice.

Chaque couple de turbines est commandée par une vanne de $0^m,50$ de diamètre, actionnée par un piston hydraulique. Un régulateur agit sur les sept orifices de chaque roue d'un groupe, et ouvre ou ferme en même temps une soupape *by-pass,* montée avant la vanne principale, et ayant pour but d'éviter les coups de bélier dans la conduite d'amenée lorsque le débit varie brusquement.

Les tiroirs des turbines étaient actionnés au début par l'eau sous pression; mais pour éviter l'usure rapide produite par l'eau sablonneuse des crues on a employé l'huile mise sous pression au moyen d'air comprimé. L'huile et l'air sont comprimés par une pompe actionnée par l'arbre principal. Chaque couple de turbines produit 750 chevaux, et est manchonnée avec une machine à courant triphasé de la *General Electric Company,* de 450 kilowatts, à 500 volts; la fréquence est 60 périodes par seconde.

Les deux excitatrices sont des dynamos de 17,5 kilowatts, à 125 volts, faisant 1100 tours par minute.

Digitized by Google

Les génératrices peuvent fonctionner indépendamment ou en quantité. Le tableau porte deux séries de barres collectrices.

Du tableau des génératrices le courant se rend aux deux panneaux des transformateurs portant les interrupteurs et les ampèremètres de chaque série de transformateurs. Il y a deux groupes de trois transformateurs de 160 kilowatts, refroidis par un ventilateur, et portant la tension de 500 volts à 11500 volts. Leurs enroulements primaire et secondaire sont montés en triangle. Un septième transformateur sert de réserve.

Les interrupteurs produisent une rupture rapide de 30^{cm} de longueur.

Les trois panneaux du tableau à haute tension portent trois séries d'interrupteurs bipolaires à double rupture. Un quatrième panneau porte une série d'interrupteurs tripolaires à rupture simple. Ces différents interrupteurs permettent de combiner à volonté les transformateurs sur le triangle et sur chacune des lignes.

La ligne est protégée par des parafoudres Wirt. Chaque fil de ligne part de deux panneaux de marbre portant chacun quinze cylindres de laiton séparés par une distance de $0^{mm},8$. Ces deux parafoudres sont couplés en multiple et mis à la terre par l'intermédiaire de quatre tiges de graphite de 19^{mm} de diamètre et de 305^{mm} de longueur, ayant une résistance de 100 ohms. La résistance interposée sur le fil de terre est donc 400 ohms. Une choking-coil formée de deux anneaux de 50^{cm} de diamètre, enroulés chacun de 45^{m} de fil de $5^{mm},2$ de diamètre, portés séparément par des isolateurs de porcelaine pour haute tension et montés en série, est intercalée entre le tableau et le parafoudre.

Les poteaux ont $7^{m},80$ de longueur et sont espacés d'environ 37^{m}. Ils portent deux traverses supportant les deux lignes formées chacune de trois fils de cuivre nus de $5^{mm},2$ de diamètre. Deux de ces conducteurs sont portés par la traverse supérieure, courte; les quatre autres sont portés par la traverse inférieure, plus longue. Chaque ligne est montée suivant un triangle équilatéral de 61^{cm} de côté. Les fils sont fixés sur des isolateurs à triple cloche, de la *General Electric Com-*

Digitized by Google

pany, ayant un diamètre de 152^{mm}; ils sont transposés tous les 1600^{m}. La distance entre les poteaux de transposition est 24^{m}. La ligne, entre l'usine génératrice et Bakersfield, a une longueur de $23^{km},2$. De Bakersfield part une ligne de 16^{km} allant à Stockdale. La longueur totale de transmission est donc environ 40^{km}.

La ligne à haute tension dessert une série de petites sous-stations équipées uniformément de transformateurs de 15 kilowatts, ventilés naturellement. Les bobines primaires sont isolées entre elles par de minces couches de feutre. Entre les bobines primaires et secondaires se trouve un espace d'air de 13^{mm} d'épaisseur. Ces transformateurs sont montés sur un bâti de fonte, et recouverts d'un cylindre de tôle ondulée surmonté d'un toit permettant la ventilation. Ces appareils fournissent le courant aux lampes et aux moteurs. Ces derniers sont du type asynchrone, et leur puissance varie de 2 à 75 chevaux. Des stations d'irrigation renferment une pompe centrifuge actionnée par un moteur d'induction.

§ XI. — Transport d'énergie électrique de la Manufacturing Company de Chambly (Canada).

Un barrage construit sur la rivière Richelieu, près du village du même nom, permet d'utiliser une chute de $8^{m},40$ et une puissance effective d'environ 20000 chevaux. L'usine génératrice est destinée à alimenter la ville de Montréal située à une distance de 40^{km}. Elle est prévue pour huit machines de 2000 kilowatts. La partie amont du bâtiment forme barrage dont la crête est à 60^{cm} au-dessus du niveau de l'eau, et renferme le tableau des machines ainsi que diverses annexes. Ce mur présente à sa partie inférieure, en amont, huit chambres voûtées recevant les turbines dont l'axe horizontal est perpendiculaire à la direction de l'usine. Chacun de ces logements reçoit deux paires de turbines horizontales, centripètes, dont l'axe traverse le mur pour actionner directement la génératrice montée dans la salle des machines dont le sol est au-dessous de la crête du barrage. Chaque récepteur hydraulique est constitué par quatre turbines de 660 chevaux faisant

Digitized by Google

153 tours par minute. Chaque paire de turbines repose sur un bâti de fonte fixé au-dessus du puits de décharge des turbines. Chacun des récepteurs a donc une puissance totale de 2640 chevaux.

La régulation des turbines est réalisée par un régulateur électromécanique Giessler à relais. Les boules du régulateur actionnent un petit levier oscillant entre deux contacts électriques. Ceux-ci font fonctionner des électro-aimants qui embrayent des manchons portés par l'arbre principal et commandant les vannes de chaque turbine au moyen d'engrenages.

Deux turbines, dont les roues ont 712^{mm} de diamètre, fournissent 750 chevaux aux excitatrices.

L'arbre de chaque groupe de quatre turbines traverse un plateau d'acier fixé dans le mur, et est manchonné directement avec une génératrice de courant diphasé de 2000 kilowatts, produisant une tension de 12000 volts, à la fréquence de 60 périodes par seconde. Ces machines, du type Stanley, sont à inducteur unipolaire, à double induit, et à bobine excitatrice unique de $254^{mm} \times 254^{mm}$ de section, dont le conducteur est enroulé sur une carcasse de laiton. La pièce tournante de l'inducteur a 3^{m} de diamètre. Les connexions des machines au tableau se composent de câbles sous plomb, isolés au caoutchouc.

Par mesure de sécurité, et pour faciliter les réparations sans danger pour les ouvriers, on a établi deux lignes dont chacune est capable de transmettre la totalité de la puissance à Montréal.

Les poteaux ont une longueur minimum de 12^{m} et sont munis de deux traverses portant chacune deux isolateurs de porcelaine, à triple cloche, analogues à ceux du Niagara, mais sans gouttière. Les fils de ligne ont 67^{mm^2} de section et sont disposés suivant le carré adopté pour le courant diphasé. Le sommet des poteaux porte un fil à pointes, de même que chaque extrémité des traverses. Ces cinq fils de fer sont réunis et mis à la terre à chaque poteau au moyen d'un tube à gaz, de fer, de $2^{m},40$ de longueur. Au-dessous de la ligne principale, une petite traverse supporte les deux fils téléphoniques de 2^{mm} de diamètre.

L'usine d'éclairage de la *Royal Electric Company*, à Mont-

Digitized by Google

réal, emploie 6000 chevaux pour alimenter des lampes à incandescence, des lampes à arc et des moteurs à courant continu. Les grandes génératrices de courant diphasé en service dans cette usine pour l'éclairage à incandescence et les moteurs sont réenroulés comme moteurs synchrones recevant directement le courant de 12000 volts.

Une batterie de transformateurs à courant alternatif de 150 kilowatts réduit la tension du courant diphasé à 1000 et à 2000 volts. Ces transformateurs sont placés dans un récipient de tôle plein d'huile et entouré d'une enveloppe dans laquelle on fait circuler de l'eau fraîche.

Une seconde usine génératrice desservant la ville de Montréal utilise les rapides de Lachine. Elle est prévue pour recevoir douze machines à courant triphasé de la *General Electric Company*, à inducteur tournant, de 750 kilowatts. Ces génératrices produisent 4400 volts à 175 tours par minute, avec une fréquence de 60 périodes par seconde; elles sont excitées chacune par une excitatrice compound de 40 kilowatts à 150 volts, faisant 875 tours par minute.

Chaque génératrice est manchonnée avec un arbre horizontal attaqué par six turbines à axe vertical au moyen de roues d'angle. Ces turbines ont un diamètre de $1^{m},45$, et font 83 tours par minute sous une chute de $4^{m},80$. Les régulateurs à boules des turbines actionnent chacun un levier, avec dashpot à alcool, oscillant entre deux contacts; ceux-ci sont reliés à des électro-aimants qui embrayent au moyen de disques la transmission qui commande l'admission des turbines.

La ligne, formée de trois fils de $8^{mm},25$ de diamètre disposés suivant un triangle équilatéral de 46^{cm} de côté, est portée par des isolateurs type Niagara, fixés sur des poteaux de fer à treillis. Ces poteaux sont bétonnés sur une hauteur de $2^{m},10$, et sont espacés de 31^{m} environ. La ligne étant exposée à des vents violents, les poteaux sont essayés à un effort latéral d'environ 2800^{kg}.

La distance de l'usine à la première sous-station est égale à 9^{km}. La ligne est protégée par des parafoudres Wirt. Les transformateurs, montés par groupes de trois, sont isolés à l'huile et refroidis par une enveloppe d'eau.

Digitized by Google

§ XII. — Installation des mines de Carmaux.

Cette installation utilise la chaleur perdue jusqu'alors d'une batterie de fours à coke représentant une puissance d'environ 1500 chevaux.

L'usine génératrice comprend quatre machines à courant triphasé de 350 chevaux actionnées chacune par une machine à vapeur compound-tandem, à condensation, faisant 100 tours par minute. La vapeur est fournie à la pression de 8^{kg} effectifs par une batterie de chaudières tubulaires.

L'arbre du moteur porte un volant ainsi que l'inducteur, à 60 pôles, d'une machine à courant triphasé, tournant à l'intérieur de l'induit dont le noyau a $3^{m},90$ de diamètre intérieur. Le courant a une tension de 5000 volts et sa fréquence est 50 périodes par seconde.

Le tableau porte un interrupteur triple, un ampèremètre, un wattmètre et un rhéostat d'excitation par machine. Deux voltmètres servent à la mesure de la tension de chaque génératrice et au contrôle du synchronisme pour l'accouplement. Trois compteurs-wattmètres mesurent l'énergie et la puissance totales produites par l'usine.

La ligne aérienne est protégée par des parafoudres Siemens, à cornes.

L'énergie électrique est distribuée aux lampes et aux moteurs des différentes usines et mines de la Compagnie. Il y a en particulier deux ventilateurs Guibal actionnés par deux moteurs asynchrones de 35 chevaux, à 720 tours par minute, et une pompe d'épuisement mue par un moteur identique. Les puits, dont la profondeur atteint 600^{m}, reçoivent un câble armé conduisant le courant triphasé à 5000 volts environ dans les galeries. Là le courant est distribué à 240 volts aux lampes et aux moteurs actionnant les treuils, les ventilateurs, les perforatrices, etc.

Digitized by Google

§ XIII. — Installation pour l'épuisement du « Delta Memel » (Allemagne).

L'usine génératrice comprend trois chaudières Galloway de 75^{m^2} de surface de chauffe, timbrées à 8^{kg} par centimètre carré, et deux machines à vapeur verticales compound de 240 chevaux, faisant 167 tours par minute. Le volant de ces machines porte latéralement 18 pièces polaires tournant entre les deux induits, situés dans un même plan vertical, d'une machine unipolaire à courant triphasé de la *Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft*. Ces machines, d'une puissance de 160 kilowatts, du type décrit page 138 (*fig.* 80), produisent 5000 volts, à la fréquence de 50 périodes par seconde. Elles sont excitées par deux dynamos à 65 volts dont l'une est mue par une machine à vapeur verticale de 20 chevaux, et l'autre par un moteur asynchrone à courant triphasé de 20 chevaux faisant 950 tours par minute. Chacune de ces machines suffit à l'excitation des deux génératrices et à l'éclairage de l'usine.

Quatre lignes à trois fils de $3^{mm},5$ de diamètre portés par les deux traverses des poteaux desservent respectivement quatre moteurs asynchrones de 75 chevaux à 590 tours par minute, qui actionnent chacun par engrenages une roue Sagebien de 8^m de diamètre faisant 8 tours par minute et formant machine d'épuisement.

Les quatre réceptrices sont mises en marche en même temps que les génératrices. A cet effet celles-ci sont excitées au début au moyen de la dynamo commandée par la machine à vapeur de 20 chevaux.

§ XIV. — Installation de Mechanicsville.

L'usine génératrice, installée à une faible distance de la petite ville de Mechanicsville (Amérique), utilise une chute de $5^m,40$ obtenue au moyen d'un barrage construit sur la rivière Hudson. Cette installation est destinée à distribuer

Digitized by Google

l'énergie électrique dans les villes de Troy, d'Albany et autres localités voisines, et principalement dans les ateliers de la *General Electric Company*, à Schenectady. L'installation comprend sept machines à courant triphasé de 750 kilowatts construites par la *General Electric Company*, actionnées chacune par une série de quatre turbines à axe horizontal manchonnées ensemble ainsi qu'avec la génératrice.

Les machines à courant triphasé, du type A. T. B. 40-750-120-12000, ont un inducteur à quarante pôles tournant à l'intérieur de l'induit. Elles produisent 750 kilowatts à 12000 volts, à 120 tours par minute, avec une fréquence de 40 périodes par seconde. Cette fréquence un peu faible a été déterminée par l'emploi de convertisseurs dont le nombre de balais devient encombrant lorsque la fréquence est élevée.

L'installation comporte un transport de 2000 chevaux aux ateliers de Schenectady.

La ligne, de 29^{km} de longueur, est formée de trois fils de cuivre de $10^{mm},4$ de diamètre, soit 85^{mm^2} de section. On a établi une ligne unique de façon à obtenir une grande self-induction favorable au réglage automatique de la tension à l'arrivée, comme il sera expliqué plus loin.

Les appareils récepteurs à Schenectady consistent en deux moteurs synchrones de 500 et de 100 kilowatts actionnant le laboratoire d'essais, et en trois convertisseurs de 400 kilowatts distribuant l'énergie aux ateliers de construction. La tension du courant triphasé est réduite à la valeur convenable pour les convertisseurs au moyen de transformateurs refroidis par ventilateur.

Un moteur synchrone, type A. P. B. 12-500-400-10000, de 500 kilowatts, à inducteur tournant à douze pôles, faisant 400 tours par minute, reçoit directement le courant triphasé à la tension de 10000 volts; il actionne la génératrice pour tramways, type M. P. 4-500-375-550, fournissant un courant continu de 550 volts.

Un moteur synchrone, type A. P. B. 8-100-600-10000, à inducteur tournant à huit pôles, de 100 kilowatts, faisant 600 tours par minute, et enroulé pour la tension de 10000 volts, actionne les dynamos destinées à fournir le courant d'excitation des machines soumises aux essais.

Digitized by Google

De la sorte, les variations de vitesse des génératrices du laboratoire ne peuvent provenir que d'un changement de la fréquence.

Les moteurs synchrones ont été choisis de préférence aux moteurs asynchrones pour plusieurs raisons :

1° Les moteurs synchrones conservent une vitesse plus constante lorsque leur charge varie;

2° En réglant convenablement leur excitation, ils ne retardent pas la phase du courant; par suite le facteur de puissance pour les génératrices, la ligne, les transformateurs et les moteurs, est égal à l'unité;

3° Les moteurs synchrones bien établis peuvent supporter une charge double, triple, et au-dessus, de la charge normale sans *caler,* cette surcharge étant limitée comme durée par l'échauffement des fils, tandis que les moteurs asynchrones construits pour supporter ces surcharges sans caler ont un faible facteur de puissance et un rendement médiocre à charge normale.

L'excitation de ces moteurs synchrones reste invariable. et par suite ne demande aucune attention.

Les trois convertisseurs de 400 kilowatts sont du type T. C. 10-400-480-2 × 250. Ils portent deux collecteurs à lames et deux collecteurs à bagues alimentés par les bobines secondaires indépendantes d'une même série de transformateurs refroidis par ventilateur. Les deux collecteurs montés en quantité donnent 250 volts pour les moteurs et les lampes des ateliers. Montés en série, ils donnent 500 volts; à cette tension le courant est utilisé par le laboratoire.

La canalisation à trois fils alimentée par les convertisseurs dessert les lampes et les moteurs des ateliers. Pour assurer l'équilibre des deux ponts, les secondaires des transformateurs sont montés en étoile dont le centre est relié au fil neutre de la canalisation.

On a adopté un dispositif permettant d'obtenir une tension constante aux balais des collecteurs des convertisseurs. A cet effet, ces machines ont une double excitation, l'une produite par un enroulement en dérivation, l'autre par un puissant enroulement en série. Les bobines en série des trois convertisseurs sont toutes montées en tension, de telle sorte que

Digitized by Google

ces trois machines forment une unité. L'enroulement en série de chaque convertisseur est shunté par un rhéostat. Les rhéostats des shunts et ceux des enroulements en série sont réglés de telle façon que, la tension à l'usine génératrice étant maintenue constante, et la charge des convertisseurs étant nulle, la force contre-électromotrice produite par le champ engendré par l'enroulement en dérivation est inférieure à la tension de la ligne, aux bornes de la machine. Il en résulte que la phase du courant est retardée. Ce courant réagissant sur la ligne, grâce à l'inductance de celle-ci, donne naissance à une composante en retard qui réduit la tension à la station réceptrice. A mesure que les convertisseurs débitent davantage, cette composante diminue, s'annule, puis change de signe, la force contre-électromotrice produite par les deux enroulements du convertisseur devenant supérieure à la tension aux bornes : la tension à l'extrémité de la ligne augmente donc.

On peut de la sorte, en maintenant constante la tension à l'usine génératrice, obtenir une tension constante aux balais des collecteurs des convertisseurs, tant à charge nulle qu'à pleine charge.

Comme les moteurs asynchrones chargent la ligne indépendamment des convertisseurs, on intercale en série sur la conduite amenant le courant triphasé à ces moteurs le primaire d'un transformateur dont le secondaire alimente un petit convertisseur qui règle la tension aux bornes de l'enroulement shunt des électros des convertisseurs.

§ XV. — Distribution d'énergie électrique a Lyon.

Cette installation a pour objet de distribuer l'énergie électrique dans la ville de Lyon et ses faubourgs, localités éminemment industrielles, comprenant 550000 habitants.

Le Rhône possède en amont de Lyon une pente d'environ 1^m par kilomètre.

D'après son cahier des charges, la Société Lyonnaise des Forces motrices du Rhône a le droit de dériver du fleuve 100^{m^3} par seconde pendant les basses eaux, et 150^{m^3} pendant les

Digitized by Google

hautes eaux, alors que le débit du fleuve atteint 600$^{m^3}$ par seconde.

Les relevés effectués pendant les années 1882 et 1893, à l'origine du canal d'amenée et à l'embouchure du canal de fuite, ont montré que la différence maximum de niveau entre ces deux points a atteint 13^m,80 et qu'on peut compter, en moyenne, sur une différence de niveau de 12^m,50 pendant 343 jours par an avec un débit de 100$^{m^3}$ par seconde, et que pendant 22 jours par an la différence de niveau est 11^m,50; mais pendant cette seconde période le débit du Rhône étant supérieur à 600$^{m^3}$ par seconde, la Société a le droit de dériver 150$^{m^3}$ d'eau par seconde.

Cette chute a été utilisée au moyen d'un canal de 18^{km},845 de longueur, construit latéralement au Rhône, en amont de Lyon.

L'installation génératrice comporte quatre parties principales :

1° Un ouvrage de prise d'eau, avec mur de garde et écluse;

2° Un canal d'amenée, avec réservoir régulateur et déversoir;

3° L'usine avec son écluse;

4° Un canal de fuite.

L'ouvrage de prise d'eau comprend un canal ayant son origine en face de Jons, et utilisant sur une partie de son parcours un ancien bras du Rhône. Sa longueur, de l'origine au mur de garde, est 5^{km},575, et sa largeur au plafond 60^m.

L'ouvrage de garde est formé d'un barrage en maçonnerie perpendiculaire à la direction du canal, portant vingt-deux vannes circulaires de 3^m de diamètre, dont quatorze sont manœuvrées au moyen de treuils à main, et huit sont mues par des pistons hydrauliques. Une petite turbine fonctionnant sous la chute créée par le barrage lorsque les vannes sont fermées commande une pompe fournissant l'eau sous pression aux vannes hydrauliques. Ce matériel est installé dans un petit bâtiment construit à l'extrémité droite du mur de garde. De ce même côté se trouve une écluse de 16^m de largeur et de 105^m de longueur utile. Le remplissage et la vidange du sas s'effectuent au moyen d'un égout circulaire ménagé dans chacun des bajoyers et communiquant avec le

Digitized by Google

sas sur toute sa longueur au moyen d'une série d'ouvertures. Ces égouts sont commandés à chacune de leurs extrémités par deux vannes cylindriques horizontales, équilibrées, de $1^{m},60$ de diamètre.

Le canal d'amenée, du mur de garde à l'usine, a une longueur de $10^{km},205$, et une pente de 10^{cm} par kilomètre. Du kilomètre 9 au kilomètre 11 + 500 se trouve un réservoir naturel d'une superficie de 160 hectares. Le canal à une largeur de 60^{m} au plafond entre le mur de garde et le réservoir, et de 70^{m} en aval de ce réservoir, et s'élargit à 165^{m} en amont de l'usine.

Au kilomètre 8 + 600 on a établi sur la rive droite du canal un déversoir dont le seuil est à la cote 180,50, c'est-à-dire au niveau des plus hautes eaux à la prise. Ce déversoir se compose de cinq bassins consécutifs à deux étages, dont le mur extérieur est demi-circulaire, a 10^{m} de rayon et tourne sa convexité vers le canal. Le développement total des murs extérieurs est 175^{m}.

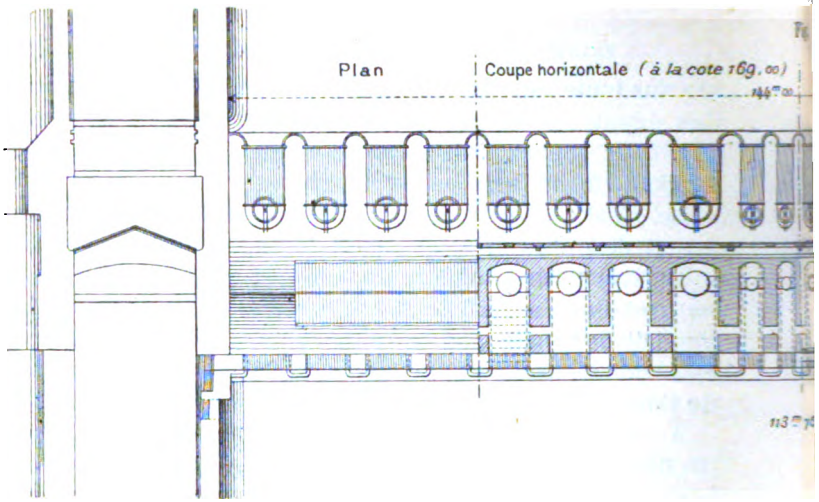
L'usine forme barrage normal au canal d'amenée. Elle est flanquée sur la rive gauche par deux bâtiments annexes servant de magasin, d'atelier de réparation, de laboratoire et d'habitation, et sur la rive droite par le bajoyer du large d'une écluse à deux sas en cascade ayant chacun 16^{m} de largeur dans œuvre et 105^{m} de longueur utile. Le remplissage et la vidange de ces sas s'effectuent au moyen d'égouts cylindriques ménagés dans chaque bajoyer et commandés par douze vannes circulaires horizontales de $1^{m},60$ de diamètre.

Cette écluse ainsi que celle du mur de garde ont été imposées à la Compagnie, le canal devant être utilisé par la navigation.

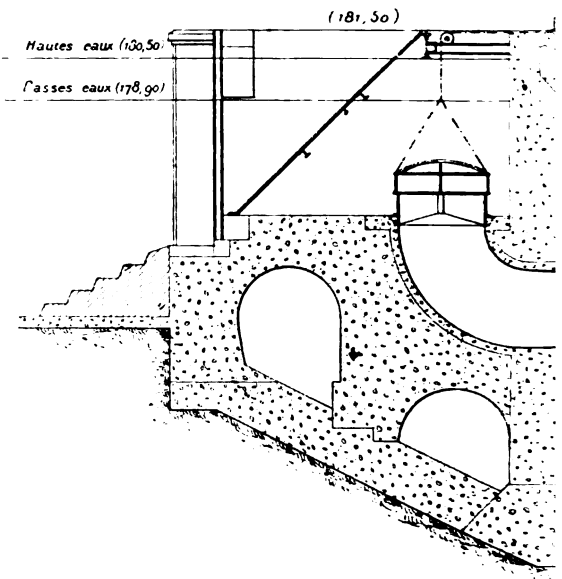
Le canal de fuite a une longueur de $3^{km},270$. A une faible distance de l'usine, il s'incurve à droite pour suivre le mur d'enceinte fortifiée de la ville, et débouche dans le Rhône en amont du Grand Camp. Il a une largeur uniforme de 70^{m} au plafond. Celui-ci est horizontal, et pour le débit maximum de 166^{m^3} par seconde, la pente de la surface de l'eau ne dépasse pas 10^{cm} par kilomètre.

Le tirant d'eau dans toute l'étendue du canal, en amont et

Digitized by Google



Fig



Digitized by Google

98.

Coupe horizontale (à la cote 182,00)

(176,35)

l'axe au 15 km 780.

Portail

99.

IV
(176,50)

III
(172,65)

Plus hautes eaux (171,96)

II
(169,00)

Étiage (166,96)

I

Digitized by Google

en aval de l'usine, est au minimum $2^m,50$, et en moyenne $3^m,50$.

Le canal est traversé par sept ponts d'acier, à poutres droites à trois travées.

Le niveau maximum de l'eau à la prise est à la cote 180,50.

Les pertes de charge calculées sont :

1° Dans le cas où le canal débite 100^{m^3} par seconde sur tout son parcours,

A l'amont de l'usine, perte de charge..	$0^m,45$	$0^m,65$;
A l'aval de l'usine.....	$0^m,20$	

2° Dans l'hypothèse où le canal débite 100^{m^3} depuis l'origine jusqu'au réservoir régulateur, et 166^{m^3} du réservoir à l'usine et à l'embouchure du canal de fuite,

A l'amont de l'usine, perte de charge..	$0^m,60$	$0^m,90$.
A l'aval de l'usine.....	$0^m,30$	

La chute utile varie donc d'environ $13^m,20$ à $10^m,50$, et fournit pendant la journée une puissance normale de 12000 chevaux effectifs. Le réservoir régulateur de 160 hectares permet d'emmagasiner pendant les heures de faible charge un volume d'eau d'environ 1050000^{m^3} pendant les basses eaux et de 2250000^{m^3} pendant les hautes eaux. Ces volumes correspondent à une puissance supplémentaire de 8000 chevaux pendant quatre heures environ dans la période des basses eaux, et de 8000 chevaux pendant huit à neuf heures à l'époque des hautes eaux. A cet effet, le canal d'amenée, du réservoir régulateur à l'usine, ainsi que le canal de fuite, ont des dimensions suffisantes pour débiter 166^{m^3} par seconde.

L'usine génératrice est située à Cusset, à environ $5^{km},5$ du centre de Lyon. Elle est construite principalement en béton, et a été fondée en partie à l'air comprimé.

En amont, le barrage porte de longs avant-becs, dont la crête est à la cote 181,50, c'est-à-dire à 1^m au-dessus du niveau des plus hautes eaux à l'origine du canal, formant dix-neuf bassins de prise des turbines (*fig.* 208). Chacun de

Digitized by Google

ces bassins porte au fond une vanne cylindrique équilibrée. Cette vanne commande un coude ménagé dans la maçonnerie, et amenant l'eau à la bâche de la turbine. Chaque bassin renferme en outre une grille inclinée à 45°. Pour les génératrices, les bassins de prise ont 5^m de largeur, le diamètre des vannes est 3^m et les grilles mesurent $9^m,80 \times 5^m = 49^{m^2}$.

La partie aval du barrage a quatre étages (*fig.* 209).

L'étage inférieur est formé par les dix-neuf chambres de décharge des turbines. Le deuxième étage est constitué par les dix-neuf chambres de turbines dont les bâches traversent le plancher de fer et béton de ciment du troisième étage, situé à $0^m,70$ au-dessus du niveau des plus hautes eaux dans le bassin de décharge. Cet étage renferme divers organes de réglage des turbines et les pompes à huile.

Le quatrième étage, dont le sol est à la cote 176,50, constitue le hall des machines.

L'usine comprend seize groupes générateurs de 1250 chevaux, correspondant à une puissance totale de 20000 chevaux, et trois excitatrices de 250 chevaux.

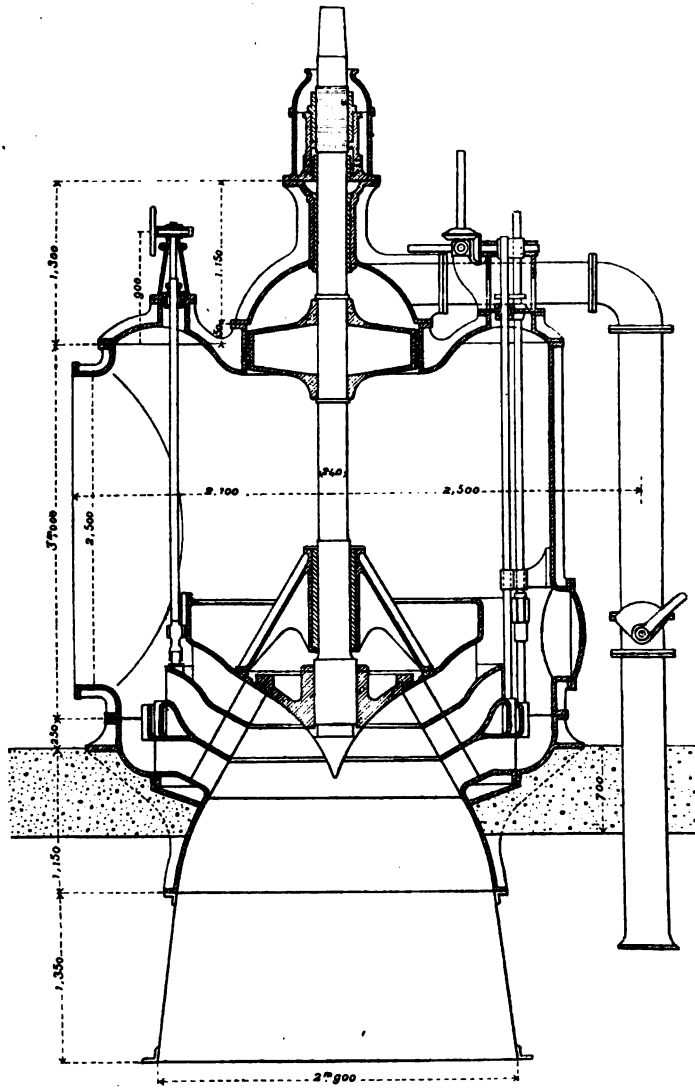
Le mur d'amont du hall des machines porte une galerie desservant les treuils des vannes de tête des turbines.

Les turbines de 1250 HP, à axe vertical, fournies par MM. Escher, Wyss et Cie (*fig.* 210), sont coniques, centripètes et sont munies d'un tuyau d'évacuation aspirant, type Jonval. Elles font 120 tours par minute. La roue-turbine a trois couronnes respectivement de vingt, vingt-six et trente-deux aubes. Le distributeur extérieur a également trois couronnes réglées au moyen de trois vannes cylindriques extérieures. La couronne supérieure est utilisée seulement pendant les hautes eaux, alors que la chute utile se trouve réduite jusqu'à 8^m. Chaque vanne des deux couronnes inférieures est commandée par trois tiges verticales terminées par une crémaillère. Les trois tiges d'une vanne sont conjuguées avec celles de la seconde, de manière à équilibrer le poids des deux obturateurs. A cet effet, les six crémaillères engrènent deux à deux avec trois roues dentées, aux extrémités d'un diamètre. Ces roues dentées sont calées sur trois arbres horizontaux convergents, et portant à leur extrémité voisine de l'axe du moteur un pignon engrenant avec une roue d'angle horizontale concen-

Digitized by Google

trique à l'axe de la turbine, et commandée soit à la main, soit

Fig. 210.



par le régulateur automatique. Ces deux vannes se dépla-

Digitized by Google

cent donc en sens inverse, l'une montant lorsque l'autre descend.

La vanne supérieure porte trois oreilles à fourche. Lorsqu'on veut manœuvrer cette vanne, on la fait tourner de manière que les trois fourches viennent s'engager entre deux collets portés par les tiges de la vanne inférieure; de cette façon les six tiges commandent simultanément les trois vannes.

Le régulateur automatique est formé par un régulateur centrifuge muni d'un tachymètre, et commandant le tiroir d'un cylindre à huile sous pression, dont le piston fait mouvoir, par l'intermédiaire d'un renvoi, la roue d'angle horizontale.

L'arbre vertical de la turbine est maintenu par deux paliers; celui du haut est un palier de butée. Le moteur est manchonné avec sa machine électrique au moyen de plateaux d'accouplement.

L'équilibrage du poids des pièces en mouvement : arbre, turbine, inducteur de la génératrice, et de la pression de l'eau sur la turbine, est obtenu au moyen d'un piston hydraulique de $1^m,80$ de diamètre, calé sur l'arbre vertical et logé dans un cylindre formant la partie supérieure de la bâche. Le fond supérieur de ce cylindre est mis en communication avec l'eau d'aval au moyen d'un tuyau plongeant dans le canal de fuite, de façon à utiliser pour l'équilibrage la différence de niveau totale. Ce tuyau est muni d'une valve permettant de régler la pression sur la face supérieure. Le piston ayant un diamètre de $1^m,80$ peut équilibrer 30 tonnes sous une chute totale de 12^m.

Les turbines des excitatrices ont une puissance de 250 chevaux effectifs, et font 250 tours par minute. Elles sont de même construction que celles de 1250 HP, sauf qu'elles n'ont que deux couronnes d'aubes au lieu de trois.

Chaque turbine a sa prise et son évacuation indépendantes, et peut être complètement isolée pendant la marche des autres récepteurs.

Le hall des machines a une longueur de 144^m et une largeur de 12^m dans œuvre. Un pont roulant le dessert sur toute sa longueur. Le bâtiment central contient les trois excitatrices, deux génératrices et le tableau des machines.

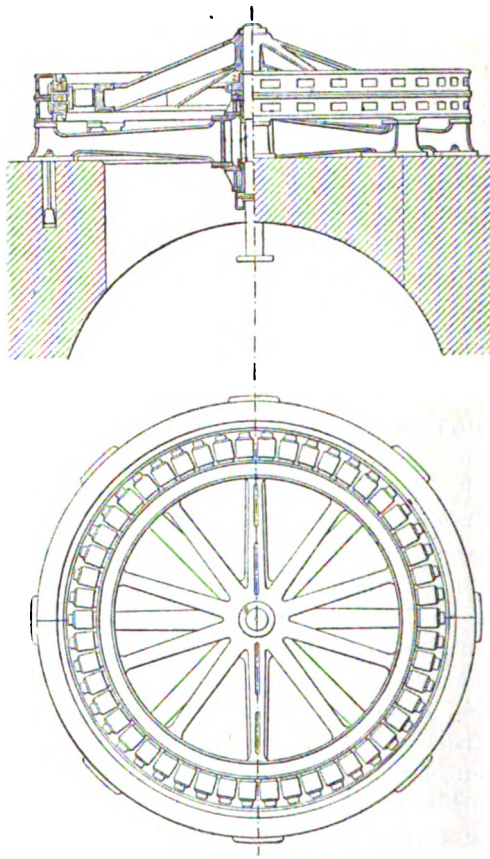
Digitized by Google

Chacun des bâtiments latéraux renferme sept génératrices.

Chaque excitatrice suffit à l'excitation de huit machines à courant triphasé. Le matériel électrique a été fourni par MM. Brown, Boveri et Cie.

Les génératrices, à axe vertical (*fig.* 211), absorbent

Fig. 211.



1250 HP. Elles engendrent un courant triphasé de 3500 volts à la fréquence de 50 périodes par seconde, et font 120 tours par minute. L'inducteur, du type *ombrelle*, tourne à l'intérieur de l'induit; sa construction est analogue à celle de l'in-

Digitized by Google

ducteur des machines Ferranti à courant alternatif que nous avons décrit Chapitre II. Il se compose d'un volant de fonte horizontal, en deux parties, ayant dix bras à section en double T, et calé à l'extrémité supérieure de l'arbre. La jante, à section en U, porte cinquante noyaux d'acier cylindriques terminés par une pièce polaire rectangulaire, fixés sur la jante au moyen de vis d'acier. Chaque noyau porte une bobine excitatrice formée de 61 spires et constituée par un ruban de cuivre enroulé de champ. Un collecteur à deux bagues, calé sur l'arbre de la machine, au-dessous de l'inducteur, amène le courant d'excitation.

L'induit, extérieur, est en deux parties. La carcasse, de fonte, est boulonnée sur les extrémités d'un bâti de fonte, en forme d'étoile à huit branches, en deux parties, fixé sur le sol même de l'usine, et dont le moyeu forme le palier unique de la génératrice. Le noyau de tôle, à surface lisse, porte 150 trous circulaires très voisins de la surface intérieure, dans lesquels est logé l'enroulement en tambour. Dans le but d'augmenter la ventilation de l'induit, le noyau est formé de plusieurs paquets superposés et séparés par une couche d'air.

Les excitatrices produisent 170 kilowatts, soit environ 1400 ampères et 120 volts, à 250 tours par minute. Le bâti circulaire extérieur, de fonte, forme culasse, et porte intérieurement quatre noyaux d'acier cylindriques avec épanouissements polaires circulaires, recevant les bobines d'excitation. Le bâti est terminé à sa partie inférieure par un croisillon dont le moyeu forme palier. Un arc boulonné à la partie supérieure de la culasse porte le second palier.

Le plancher du tableau des machines est un peu au-dessus du sol de la salle. Ce tableau est formé d'une charpente de fer sur laquelle sont fixés 21 panneaux verticaux de marbre blanc.

Les trois panneaux du milieu (*fig.* 212) portent les appareils de réglage et de contrôle des excitatrices; ils comprennent chacun un interrupteur double, un ampèremètre, un voltmètre et un rhéostat d'excitation. Les deux panneaux voisins, à droite et à gauche, portent les appareils totalisateurs et l'interrupteur triple des deux conduites amenant

Digitized by Google

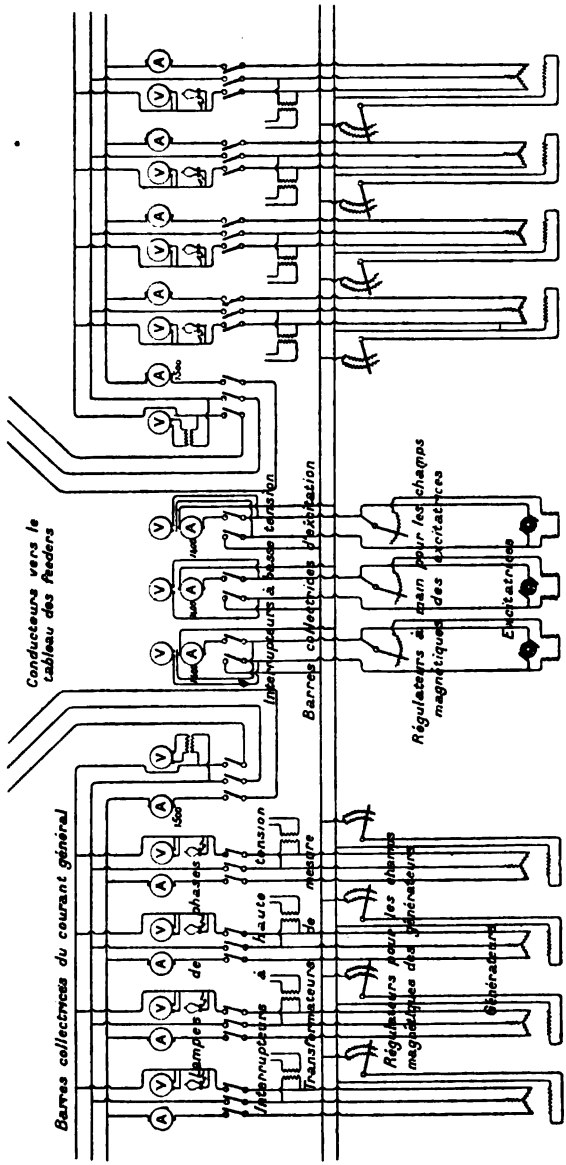


Fig. 212.

chacune le courant des barres collectrices de huit généra-

Digitized by Google

trices au tableau des feeders. Les seize autres panneaux, huit à droite et huit à gauche, sont réservés aux appareils des machines à courant triphasé, et portent chacun un ampèremètre à shunt, un voltmètre, une lampe pour le synchronoscope, la poignée d'un interrupteur triple à haute tension, et un rhéostat d'excitation. Les volants des rhéostats sont montés sur une tablette de marbre horizontale. Les rhéostats et leurs cadrans sont placés derrière le tableau, sous la charpente métallique. Chaque palette est calée sur un arbre horizontal commandé par l'axe vertical du volant au moyen d'une paire de roues d'angle. Deux transmissions générales permettent de manœuvrer simultanément chaque groupe de huit rhéostats de génératrices.

Les interrupteurs à haute tension ont six palettes de cuivre fixées, par l'intermédiaire d'isolateurs de porcelaine, sur l'axe horizontal manœuvré par la poignée du tableau. Ces appareils, à mouvement rotatif, coupent deux fois chaque pôle.

Les interrupteurs, les coupe-circuit, les barres collectrices et les connexions sont montés derrière le tableau.

Les connexions du tableau aux machines sont formées par des câbles isolés (à trois conducteurs pour le courant triphasé), logés dans un caniveau ménagé dans le sol de la salle et recouvert d'une plaque de tôle striée.

Les deux conduites générales amènent le courant triphasé, à la tension de 3500 volts, du tableau des machines au tableau des feeders installé à une extrémité de l'usine sur une plateforme établie au-dessus de la porte d'entrée.

Le tableau des feeders (*fig.* 213) comprend quinze panneaux de marbre blanc. Le panneau central porte trois voltmètres électrostatiques. Les deux panneaux voisins, à droite et à gauche, commandent les deux conduites venant du tableau des machines. Ils ont chacun un interrupteur triple et trois ampèremètres, un sur chaque conducteur. Neuf des douze panneaux suivants commandent les neuf feeders installés pour l'utilisation de 15000 chevaux. Ces panneaux portent un interrupteur triple semblable à ceux du tableau principal, trois coupe-circuit et trois ampèremètres, un sur chaque conducteur.

Les derniers panneaux sont réservés à des feeders à venir.

Digitized by Google

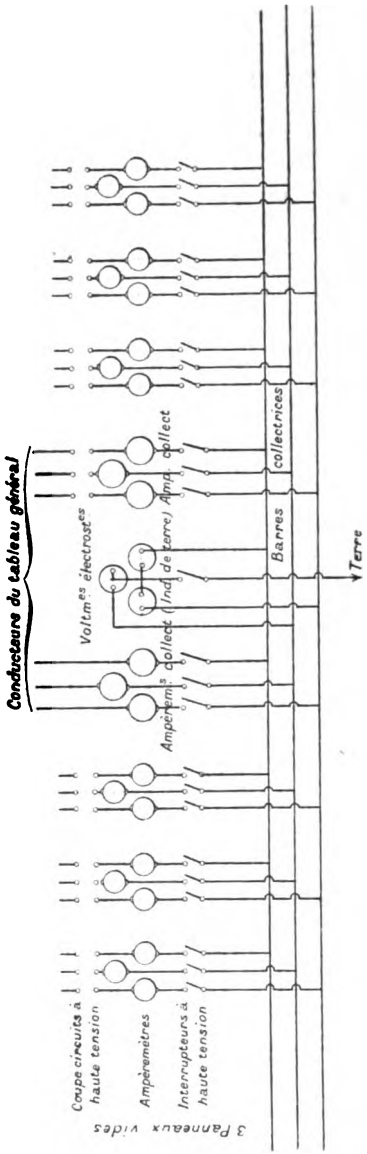


Fig. 213.

Les barres distributrices, ainsi que les interrupteurs, les

Digitized by Google

coupe-circuit et les diverses connexions sont montés derrière le tableau.

Les trois voltmètres électrostatiques forment indicateur de terre. Chacun d'eux a une borne reliée à l'une des trois barres générales du tableau; les trois autres bornes sont réunies ensemble et reliées à la terre. Lorsque l'isolement des trois pôles est parfait, les trois voltmètres indiquent la tension efficace entre une borne d'une machine et la terre. Si l'isolement de l'un des pôles devient défectueux, le voltmètre correspondant indique une tension plus faible, et les deux autres voltmètres des tensions plus élevées que dans le cas précédent. Cet indicateur de terre est analogue à celui employé par la maison Siemens et Halske dans la distribution d'énergie aux gares de Dresde.

Le transport de la puissance électrique fournie par l'usine s'effectue au moyen de neuf feeders composés de trois conducteurs isolés au papier et à la toile imprégnés de matières isolantes, placés côte à côte sous une double enveloppe de plomb, et protégés par deux rubans d'acier. Ces câbles sont construits par la Société Berthoud-Borel qui a monté dans ce but une usine à Lyon.

La section maximum des feeders est $3 \times 300^{mm^2}$. Le feeder le plus long a plus de 8^{km}.

Trois de ces feeders traversent le Rhône sur le pont de la Guillotière, construit en pierre. Le service des Ponts et Chaussées ayant fait des objections pour le passage des ponts métalliques, la Société s'est résolue à traverser directement le Rhône, et a posé sept câbles de $3 \times 150^{mm^2}$ dans le lit même du fleuve, en aval du pont Morand. Par surcroît de précaution, ces câbles ont été munis d'une seconde armature en fil d'acier.

La distribution dans la ville s'effectue au moyen de transformateurs de 100 et de 75 kilowatts logés dans des kiosques de tôle mesurant $1^m,20$ de diamètre, installés sur la voie publique et alimentant un réseau secondaire formé de câbles armés à trois conducteurs parallèles sous la même enveloppe de plomb.

Voici, d'après son cahier des charges, les tarifs maxima que la Société peut appliquer à la vente de l'énergie *mesurée*

Digitized by Google

aux bornes des moteurs et rapportée au cheval électrique de 736 watts :

PUISSANCE DU MOTEUR en chevaux.	PRIX DU CHEVAL-HEURE, en francs.	PRIX DU CHEVAL-AN, en francs.
Au-dessous de 1 HP.	Par $\frac{1}{10}$ de HP, 0,027	Par $\frac{1}{10}$ de HP, 72.
1	0,270	720
2	0,260	695
3	0,250	670
4	0,240	645
5	0,230	620
10	0,200	510
15	0,170	435
20	0,140	360
25	0,130	330
30	0,120	300
35	0,110	285
40	0,100	270
45	0,095	260
50	0,090	250

Pour la vente au compteur, la Société a le droit d'exiger une durée de fonctionnement minimum de 150 heures pendant chaque mois.

Les prix de vente actuels du kilowattheure pour les moteurs varient entre 0fr,25 pour les petites puissances et 0fr,07 pour les grandes puissances, sans minimum de consommation.

Pour l'éclairage, le prix de l'énergie électrique dépend de la catégorie de l'abonné.

CATÉGORIE DE L'ABONNÉ.	PRIX de l'hectowattheure.
	fr
Appartements	0,08
Bureaux et magasins	0,07
Cafés, restaurants, hôtels et assimilables	0,06

Digitized by Google

Pour les usines chaque cheval de moteur donne droit à dix lampes de 16 bougies pour lesquelles l'énergie électrique est facturée $0^{fr},05$ l'hectowattheure.

§ XVI. — Tramways de Marseille.

Cette installation a été faite d'après la première méthode que nous avons exposée précédemment. L'équipement des voitures est à courant continu, mais le réseau étant très étendu — la distance entre les points extrêmes atteint 20^{km} — ce réseau est alimenté par une série de sous-stations qui transforment en courant continu à 550 volts la puissance produite sous forme de courant triphasé à 5500 volts d'une usine génératrice unique de 6000 chevaux, située à Saint-Giniez.

L'installation est prévue pour desservir simultanément 325 voitures automotrices pesant 10 tonnes en charge, et 175 remorques. La vitesse moyenne étant de 12^{km} par heure, la puissance nécessaire aux bornes des moteurs d'une voiture a été évaluée à 6,66 kilowatts. Chaque remorque équivalant, au point de vue de la traction, à la moitié d'une voiture motrice, et le rendement total entre les bornes des moteurs des voitures et l'arbre des machines à vapeur étant égal à 0,70, la puissance totale des moteurs de l'usine génératrice doit être égale à 5340 chevaux. On a installé immédiatement quatre unités de 1000 kilowatts.

Le bâtiment de l'usine a une longueur de 75^{m} et une largeur de 60^{m} dont 22^{m} pour la salle des machines et 36^{m} pour la salle des chaudières.

Vingt générateurs semi-tubulaires à bouilleurs, de 200^{m^2} de surface de chauffe, timbrés à 9^{kg} par centimètre carré, sont disposés sur deux rangées séparées par un couloir central de 8^{m} de largeur pour le service des foyers. Chaque série est formée de deux batteries de cinq chaudières, et est desservie par une cheminée de 60^{m} de hauteur et de $3^{m},200$ de diamètre intérieur au sommet.

Chacun des quatre groupes générateurs de 1000 kilowatts se compose d'une machine à vapeur horizontale compound, à deux manivelles, développant normalement 1500 chevaux

Digitized by Google

à la pression de $7^{kg},5$ par centimètre carré, à la vitesse de 75 tours par minute. L'arbre porte un volant pesant 36 tonnes et l'inducteur à 40 pôles de la génératrice à courant triphasé de 1000 kilowatts, à 5500 volts et à la fréquence de 25 périodes par seconde. Le coefficient d'irrégularité du groupe est égal à $\frac{1}{300}$.

Trois dynamos de 710 ampères, 110 volts, accouplées directement à trois machines pilons de 120 chevaux à 210 tours par minute, fournissent le courant d'excitation et actionnent les appareils auxiliaires de l'usine.

Six sous-stations renferment ensemble quatre convertisseurs de 225 kilowatts, à six pôles, faisant 500 tours par minute, et 10 convertisseurs de 400 kilowatts, à huit pôles, faisant 375 tours par minute.

Chaque convertisseur de 225 kilowatts est alimenté par une batterie de trois transformateurs à courant alternatif de 90 kilowatts. Les convertisseurs de 400 kilowatts sont desservis par des batteries de trois transformateurs à courant alternatif de 150 kilowatts.

Les enroulements primaires des transformateurs sont connectés en triangle. Chaque enroulement secondaire est relié aux balais d'une paire de bagues connectées à deux points diamétralement opposés de l'enroulement de l'armature. Les convertisseurs portent donc six bagues.

Chaque sous-station est alimentée par une paire de feeders à trois conducteurs tressés sous la même enveloppe. La section des feeders varie entre $3 \times 70^{mm^2}$ et $3 \times 100^{mm^2}$. En cas d'accident à un feeder, la sous-station correspondante peut recevoir le courant triphasé des deux sous-stations voisines.

Les consommations de charbon garanties par kilowatt-heure aux bornes d'une génératrice sont :

	kg		kg
A pleine charge.....	1,200	à	1,250
A deux tiers de charge.....	1,500	à	1,750
A tiers de charge.....	2,000	à	2,250

Digitized by Google

§ XVII. — Tramway a courant triphasé de Lugano.

Ce tramway a été construit en 1895 par MM. Brown, Boveri et Cie.

L'usine génératrice est installée à Maroggia, localité située à 12km de Lugano. Une turbine à axe horizontal commande par l'intermédiaire d'un manchon élastique une machine à courant triphasé de 150 chevaux faisant 600 tours par minute, et produisant une tension de 5000 volts avec une fréquence de 40 périodes par seconde. Cette génératrice (*fig.* 62, p. 117) est d'un type intermédiaire entre une machine à inducteur à pôles alternés excité par une bobine unique, et une machine unipolaire. L'induit fixe à rainures est formé de deux noyaux de tôle séparés par une couronne non magnétique et fixés à l'intérieur d'un bâti circulaire qui les relie magnétiquement. Chaque bobine traverse ces deux noyaux. L'inducteur mobile à l'intérieur de l'induit est formé d'un noyau d'acier cylindrique, calé sur l'arbre, et terminé par deux étoiles à quatre branches à angle droit, décalées de 45° l'une par rapport à l'autre. Le noyau porte la bobine inductrice. Les bobines induites sont soigneusement isolées dans les cannelures des noyaux de tôle. L'excitatrice est calée à l'extrémité de l'arbre de la génératrice et présente son collecteur tourné du côté de celle-ci.

La ligne transportant l'énergie à Lugano est formée de trois fils de 5mm de diamètre. On a installé tout d'abord une seule station de transformation à Lugano, milieu de la ligne, d'autres sous-stations devant être construites au fur et à mesure du développement du trafic.

Des transformateurs réduisent la tension du courant triphasé à 400 volts.

La ligne de tramway a une longueur totale de 4900m. Son inclinaison sur une grande longueur est égale à 30mm par mètre et atteint 60mm par mètre sur trois tronçons très courts.

Les deux fils de trolley ont 6mm de diamètre et sont tendus à une distance de 250mm. Les connexions des rails sont cons-

Digitized by Google

tituées par des rubans de cuivre soigneusement rivés; il n'y a pas de fil spécial de retour.

On a prévu au début quatre voitures à 24 places, munies d'un seul moteur de 20 chevaux attaquant l'un des essieux au moyen d'une paire d'engrenages dans le rapport de 1 à 4. La vitesse des voitures est 15^{km} à l'heure. Les voitures portent deux trolleys dont l'un est à 1^{m} en arrière du premier.

L'induit mobile du moteur est muni de trois bagues dont les balais sont reliés au rhéostat de réglage monté sous la caisse de la voiture.

Chaque plate-forme porte à droite la manivelle du frein, et à gauche celle du rhéostat permettant de faire varier la vitesse de la voiture de zéro à 15^{km} à l'heure. En outre un commutateur sert à renverser le sens du mouvement et à couper le courant. Enfin on peut, à l'aide d'un second commutateur, doubler le nombre de pôles inducteurs du moteur pour franchir les fortes rampes.

L'emploi de transformateurs permet encore de distribuer un courant de tension plus élevée sur les fortes rampes : le moteur peut de la sorte fonctionner pendant un temps limité, en des points spéciaux de la ligne, avec un champ plus intense, et par suite développer momentanément une puissance supérieure à sa puissance normale.

Pour éviter les effets d'induction dans les lignes téléphoniques voisines, on a monté ces lignes à deux fils.

§ XVIII. — Chemin de fer de Stansstad a Engelberg.

Cette ligne de chemin de fer, de 22^{km} de longueur, construite en 1899, relie Stansstad, sur les bords du lac de Lucerne, à Engelberg, localité située à 560^{m} au-dessus du niveau du lac.

La voie, de 1^{m} de largeur, est formée de rails Vignole fixés sur traverses d'acier espacées de 900^{mm} d'axe en axe. La conductibilité de la voie est assurée par des connexions de cuivre. La rampe maximum est de 5 pour 100, sauf sur un tronçon de 1500^{m} sur lequel les rampes varient entre 8 et 25 pour 100, et qui est muni d'une crémaillère type échelle,

Digitized by Google

composée de deux longrines d'acier en forme d'U dans lesquelles sont rivées les extrémités des dents. Les deux extrémités de la crémaillère sont portées par des ressorts qui assurent l'engrènement sans choc avec les pignons.

L'usine génératrice est située à Obermatt, au pied de la forte rampe. Un réservoir recueille les eaux de plusieurs cascades. Un tuyau de 300^{mm} de diamètre et de 1600^{m} de longueur amène l'eau sous une charge de 385^{m} à deux roues Pelton de 200 HP, manchonnées directement avec deux génératrices à courant triphasé, à axe horizontal, à inducteur extérieur fixe et induit intérieur mobile. Ces machines ont 6 pôles, font 650 tours par minute, et fournissent un courant triphasé de 750 volts à la fréquence de 32,5 périodes par seconde. L'excitatrice est manchonnée avec une turbine spéciale.

Une partie du courant triphasé à 750 volts d'une génératrice est fournie directement à la ligne de contact; l'autre partie traverse une batterie de trois transformateurs à courant alternatif de 30 kilowatts dont le courant secondaire à 5300 volts est amené par une ligne latérale à la voie, à trois conducteurs portés par des poteaux de bois, à une sous-station distante de 11^{km} de l'usine. Là une batterie de trois transformateurs à courant alternatif de 30 kilowatts réduit la tension à 750 volts.

L'installation est protégée contre les accidents que pourrait produire la rupture d'un fil de la ligne à haute tension par le dispositif suivant :

Un petit transformateur à courant triphasé, placé à l'usine génératrice, a ses trois enroulements primaires montés en étoile dont les trois bornes sont connectées aux trois conducteurs de la ligne à 5300 volts, tandis que le centre est mis à la terre. Les trois enroulements secondaires sont montés en triangle, mais à l'un des sommets la connexion des deux bobines a lieu par l'intermédiaire d'un solénoïde à l'intérieur duquel est mobile un noyau de fer doux. Celui-ci porte un crayon de charbon normalement en contact avec un second crayon. Ces deux charbons sont intercalés dans le circuit d'excitation à 110 volts des génératrices. Si les trois conducteurs de la ligne à haute tension sont isolés du sol, les trois

Digitized by Google

tensions dans les trois côtés du triangle s'équilibrent et le solénoïde n'est traversé par aucun courant. Si une terre se produit sur un fil de ligne, la bobine primaire correspondante se trouvant en court-circuit ne reçoit plus de courant de la ligne, et il se produit dans le triangle secondaire un courant circulaire qui attire le noyau de fer doux, et coupe ainsi le courant d'excitation en donnant naissance à un arc qui rend la rupture progressive.

La ligne de contact se compose de deux fils de cuivre dur de 8^{mm} de diamètre, distants de 950^{mm}, et supportés par des fils transversaux fixés à des poteaux de bois. Le troisième conducteur est formé par les rails.

Cette ligne de contact croise une ligne à trolley ordinaire. Les deux fils à courant triphasé sont interrompus et sont fixés aux extrémités de deux supports métalliques verticaux, en forme d'U renversé. Le fil de trolley à courant continu est porté par un isolateur fixé à l'intérieur et à la partie supérieure des supports. Les véhicules portant deux contacts mobiles par fil, la prise de courant n'est pas interrompue.

Le matériel roulant se compose de cinq voitures motrices, de deux locomotives et de quatre voitures de messageries.

Les voitures, à deux boggies, pèsent 14 tonnes; la caisse a 12^{m} de longueur. L'une des boggies est munie de deux moteurs de 35 HP; l'autre boggie porte un pignon de frein qui engrène avec la crémaillère dans les fortes rampes. En outre, un frein ordinaire à main agit sur les huit roues. La vitesse normale est de 20^{km} par heure. Les moteurs font environ 470 tours par minute. Ils portent trois bagues avec balais de charbon pour démarrage par rhéostat. Un commutateur inverseur sur l'inducteur permet de changer le sens de rotation. Chaque voiture porte deux archets munis de deux cylindres d'aluminium isolés et séparés par une pièce de bois.

Sur le trajet de la crémaillère, la voiture est refoulée par une locomotive, les moteurs de la voiture ne travaillant pas. Les locomotives font aussi le service des messageries.

Les locomotives, à simple truck, portent deux moteurs de 75 chevaux commandant par engrenage et pignon un même arbre intermédiaire attaquant lui-même par engrenage l'arbre du pignon de la crémaillère. Le rapport de réduction de 1 : 15

Digitized by Google

donne une vitesse de 5^{km} à l'heure. L'arbre intermédiaire porte un embrayage à friction qui permet de débrayer l'arbre du pignon et d'embrayer deux plateaux commandant par bielles les deux essieux pour la traction par adhérence; on obtient alors une vitesse de 12^{km} à l'heure.

Les locomotives sont munies de trois systèmes de freins :

1° Frein ordinaire à sabots agissant sur les roues;

2° Moteurs utilisés comme génératrices dès que la vitesse dépasse le synchronisme;

3° Frein de sûreté agissant sur des tambours à gorges, et actionné par un embrayage à force centrifuge, à vitesse limite.

Une locomotive absorbe en refoulant une voiture sur la forte rampe un courant moyen de 95 à 100 ampères. A la descente, la locomotive attelée à la voiture fournit un courant moyen de 60 à 65 ampères.

Un rhéostat formé de trois barres de fer plongeant dans le canal de l'usine absorbe l'excédent de puissance engendrée par les moteurs à la descente. On met ce rhéostat hors circuit dès que la puissance absorbée par les véhicules en rampe est suffisante.

§ XIX. — Expériences de traction par courant triphasé, par la maison Siemens et Halske [1].

On a utilisé pour ces essais une rue non construite et peu fréquentée dépendant des communes de Gross-Lichterfelde et Zehlendorf. La voie, de largeur normale, a une longueur d'environ 1750^m. La rampe maximum est de $\frac{1}{27}$ sur une longueur de 120^m. La voie possède une courbe de 200^m de rayon. L'usine génératrice, située à proximité du milieu de la ligne, est reliée à celle-ci par un embranchement qui se raccorde à la voie principale au moyen d'une courbe de 100^m de rayon. A l'entrée du dépôt se trouve encore une courbe de 40^m de rayon.

Le programme de ces expériences était le suivant :

1° Étude de l'équipement électrique de la locomotive avec

[1] Voyez *Elektr. Zeitsch.*, 7 juin 1900.

Digitized by Google

emploi de moteurs à courant triphasé, pour des vitesses s'élevant jusqu'à 60^{km} à l'heure et pour des tensions en ligne jusqu'à 10000 volts.

2° Essai de divers dispositifs pour la prise du courant, pour la protection contre les effets de la rupture des fils, pour les aiguillages et les courbes, etc.

La voie étant installée sur une rue communale, un filet protecteur sous la conduite de distribution était imposé.

La haute tension de distribution a fait rejeter la mise d'un pôle à la terre; on a donc adopté une ligne de contact aérienne à trois conducteurs.

La prise de courant par poulie a été écartée comme étant trop sujette à déraillement. La prise de courant par-dessous était éliminée par la présence du filet protecteur. Il restait donc deux solutions pour la prise de courant :

1° Prise par-dessus les fils de contact;

2° Prise latérale.

1. *Prise par-dessus les fils.* — Des mâts de fer en treillis, placés tous les 40^{m}, portent à leur partie supérieure une pièce de bois verticale sur laquelle sont fixés en bout trois bras horizontaux disposés dans un même plan vertical, à des hauteurs différentes. Ces trois bras ne sont pas de même longueur, le bras supérieur étant le plus court et le bras inférieur le plus long. Chacune de ces consoles porte à son extrémité une tige de fer sur laquelle est fixé un isolateur de porcelaine à triple cloche. Ces isolateurs, essayés à la tension de 15000 volts pendant une demi-heure, portent les trois fils de contact, de cuivre dur, de 8^{mm} de diamètre. Ces trois conducteurs ne se trouvent donc pas dans un même plan vertical, le fil supérieur étant le plus éloigné et le fil inférieur le plus rapproché en plan de l'axe de la voie. Tous les 500^{m} un tendeur à palan exerce un effort total de traction de 1500^{kg} sur les trois conducteurs, de façon à maintenir en toutes saisons une flèche constante de 150^{mm}. A cet effet, les consoles horizontales des poteaux peuvent osciller autour d'un axe vertical.

La prise mobile de la locomotive se compose de trois tiges métalliques horizontales, oscillant dans des plans verticaux

Digitized by Google

perpendiculaires à la voie, autour d'un axe passant par l'une de leurs extrémités et parallèle à l'axe de la voiture. Ces tiges sont appuyées contre les conducteurs par des ressorts à boudin, et un taquet limite leur course inférieure. En plan les fils sont en zigzag, de façon à répartir l'usure des tiges de contact sur une longueur de 200^{mm}. On améliore la prise de courant en doublant les contacts mobiles.

La chute à terre des conducteurs est empêchée par un filet formé de quatre fils d'acier galvanisés de 5^{mm} de diamètre tendus sous la conduite de distribution, reliés tous les $1^{m},5$ par un fil d'acier galvanisé de 4^{mm} de diamètre, et fixés à des consoles métalliques portées par les poteaux. Chaque poteau est connecté aux rails au moyen d'un fil de cuivre de 8^{mm} de diamètre.

A un embranchement, on abaisse progressivement les trois conducteurs de la voie principale. On arrête la conduite de l'embranchement à une distance de la voie principale telle que la locomotive puisse circuler librement sur celle-ci. Les conducteurs de l'embranchement sont également abaissés à l'origine, puis reprennent progressivement leur hauteur normale. On obtient de cette façon un passage sans choc d'une ligne à l'autre.

L'expérience a montré que par suite de la flèche des fils le passage des tiges de contact sur les isolateurs, aux vitesses élevées, donne lieu à des petits chocs qui produisent des étincelles. On a alors adopté le dispositif suivant.

2. *Prise latérale.* — Les trois fils sont disposés dans un même plan vertical, et fixés à des pièces métalliques scellées sur les isolateurs de porcelaine à triple cloche dont les tiges sont portées par la corde verticale d'un arc en fer à U boulonné sur le poteau. La corde de l'arc est attachée à deux tendeurs à vis qui permettent de régler exactement la hauteur des conducteurs.

La locomotive porte trois archets à cylindre d'aluminium vertical mobiles autour de trois axes verticaux.

La ligne de contact est munie de parafoudres à cornes et de coupe-circuit.

A un embranchement, on arrête comme précédemment la

Digitized by Google

canalisation de cet embranchement de façon à laisser libre passage à la locomotive, et l'on augmente l'écartement de ces fils par rapport à l'axe de la voie à leur origine.

Lorsque la locomotive s'engage sur l'embranchement, les archets abandonnent la conduite de contact de la voie principale, leurs ressorts les amènent dans une position perpendiculaire à l'axe de la voiture sur le tronçon où la conduite est interrompue, puis ils arrivent au contact des conducteurs dont la distance à l'axe de la voie se rapproche progressivement de la valeur normale. On évite ainsi tout choc dans le passage d'une ligne à une autre.

L'usine génératrice comprend un moteur à courant continu alimenté par une batterie d'accumulateurs et actionnant une machine à courant triphasé à 12 pôles, faisant 500 tours par minute et fournissant un courant de 120 à 250 ampères, à 770 volts, à la fréquence de 50 périodes par seconde. Les connexions de l'enroulement induit peuvent être modifiées de façon à obtenir une tension de 385 à 4000 volts. Enfin, un transformateur à courant triphasé de 200 kilowatts, $\frac{750}{10000}$ volts, $\frac{157}{11,5}$ ampères, est destiné aux essais de traction à 10000 volts.

Par mesure de sécurité pour le personnel, on a mis à la terre les bâtis de la génératrice et du transformateur-élévateur, ainsi que les enveloppes des appareils et des instruments de mesure à haute tension.

La locomotive, entièrement métallique, est du type normal à cabine centrale de $1^m,300$ de longueur pour le mécanicien. Ce logement a deux portes latérales et deux larges baies vitrées en avant et en arrière. La caisse est terminée de part et d'autre par deux compartiments bas. La locomotive a une largeur de $2^m,200$ et une longueur totale entre extrémités des tampons de $6^m,300$. Le truck a deux essieux avec un empattement de $2^m,800$. Les roues ont 1^m de diamètre.

Le poids total de la locomotive complète est de 16 tonnes.

La locomotive porte deux moteurs à courant triphasé type c.D.M. 20 : 35 — 650 à 850 volts — 970 tours par minute, attaquant chacun un essieu, et pouvant développer de 30 à 120 chevaux.

Digitized by Google

L'inducteur, extérieur, est fixe. L'induit, intérieur, mobile porte un enroulement en barres de cuivre connecté à trois bagues pour démarrage par rhéostat. L'entrefer a une longueur de $1^{mm},5$. Ces moteurs sont suspendus comme à l'ordinaire sous la caisse au moyen de ressorts, et peuvent osciller autour des essieux.

Deux trains d'engrenages, dont les rapports de réduction sont 1 : 4,65 et 1 : 3,15, permettent d'obtenir les vitesses de 40^{km} et de 60^{km} à l'heure.

La même armature a servi pour les essais aux différentes tensions. Le même inducteur a été utilisé pour les expériences à basse tension sur le moteur et à 10000 volts en ligne. Pour les essais à 2000 volts on a employé un inducteur enroulé spécialement pour ce nombre de volts.

La basse tension normale aux bornes du moteur est de 650 volts. Pour la marche directe à basse tension, un transformateur additionnel permet d'obtenir 850 volts au démarrage. Pour les essais à 10000 volts en ligne, on peut augmenter à l'aide du régulateur le nombre de spires secondaires du transformateur pendant le démarrage, de façon à porter momentanément la tension au moteur de 650 à 850 volts.

Le rhéostat de démarrage est enfermé dans une boîte de fonte étanche, et logé sous la caisse.

Le régulateur permet de mettre hors circuit l'une des trois sections de l'armature de façon à réduire la vitesse de 50 pour 100. Huit crans au régulateur suffisent pour le démarrage et le réglage. Le changement de sens de rotation est obtenu à l'aide d'un commutateur-inverseur.

La locomotive est munie d'un frein comportant deux sabots d'acier par roue, et mû à volonté à la main ou par un cylindre à air comprimé.

Les transformateurs, le compresseur et son moteur, l'interrupteur à haute tension et les coupe-circuit à basse tension sont logés dans les deux compartiments extrêmes de la caisse.

Le sol de la cabine est formé d'une tôle reliée électriquement à la masse. Le point neutre du transformateur, ainsi que toutes les enveloppes des appareils de manœuvre ou de mesure à haute tension sont soigneusement connectés à la

Digitized by Google

masse. Les marchepieds et leurs mains-courantes sont portés par des isolateurs de porcelaine.

Le démarrage de la locomotive seule, à la tension de 640 volts, exige 180 ampères et dure 14 secondes pour la vitesse de 40^{km} à l'heure, et 30 secondes pour la vitesse de 60^{km} à l'heure.

Le démarrage de la locomotive remorquant 30 tonnes, pour la vitesse de 60^{km} à l'heure, à 700 volts, absorbe 190 ampères et dure 60 secondes.

En marche normale, à la vitesse de 60^{km} à l'heure, avec un poids remorqué de 30 tonnes, la locomotive absorbe à 700 volts 70 ampères avec $\cos\varphi = 0,8$.

§ XX. — Expériences de traction a grande vitesse.

Le programme de ces expériences, commencées en 1901, est, dans ses grandes lignes, le suivant :

1° On utilisera un tronçon de 23^{km} de longueur de la ligne de chemin de fer militaire de Marienfelde à Zossen, à voie normale de $1^{m},44$, avec rails fixés sur traverses de bois. Les courbes ont un rayon minimum de 1000^{m}, et la rampe maximum est de $\frac{1}{184}$.

2° La voiture, pour 50 voyageurs environ, aura deux boggies à trois essieux chargés chacun au maximum à 16 tonnes; le poids total de la voiture complète et chargée sera donc au maximum de 96 tonnes.

3° La puissance électrique sera fournie par la conduite de contact sous forme de courant triphasé à 10000 volts, à la fréquence de 45 à 50 périodes par seconde.

4° Toutes les manœuvres pourront être exécutées sur les deux plates-formes.

5° La vitesse sera de 200^{km} à 220^{km} à l'heure. Le matériel électrique devra pouvoir supporter un voyage aller et retour sur une ligne de 250^{km} de longueur.

6° La voiture sera munie de deux freins indépendants, l'un mécanique, l'autre électrique.

7° La voiture portera les appareils de mesure nécessaires.

Digitized by Google

8° Elle pourra être éclairée électriquement; cet éclairage pourra être fait par une batterie d'accumulateurs.

Voici quelques données sur le projet de la Maison Siemens et Halske.

Des expériences effectuées spécialement dans ce but ont donné pour la résistance opposée par l'air à une surface approximativement parabolique, et pour une vitesse de 200^{km} à l'heure, 90^{kg} par mètre carré de surface en projection. Pour une surface plane perpendiculaire à la direction du mouvement, l'effort est à peu près triple. La résistance de l'air croît sensiblement comme le carré de la vitesse.

La surface opposée par la voiture à l'air est, en projection, d'environ 10^{m^2}. On a admis en outre un effort de traction de $4^{kg},5$ par tonne pour la résistance au roulement, le frottement des fusées, les chocs aux joints des rails. La puissance sur la jante des roues pour la vitesse de 200^{km} à l'heure est donc

$$(4,5 \times 96 + 90 \times 10) \times \frac{55,56}{75} = 1000 \text{ chevaux environ.}$$

La voiture a une longueur d'environ 24^m entre extrémités des tampons, une largeur de $2^m,940$, toutes saillies comprises, et une hauteur de $4^m,300$, organes de prise de courant non compris. Le poids total de la voiture avec 48 voyageurs et deux employés est d'environ 95 tonnes.

Chaque boggie porte deux moteurs à courant triphasé de 250 chevaux, à trois ondes. L'inducteur de chaque moteur est calé directement sur un essieu, et est muni de trois bagues pour l'amenée du courant. Les roues ont un diamètre de 1250^{mm}. L'induit est extérieur et fixe. Son noyau étant soumis à des variations magnétiques de faible fréquence peut n'avoir qu'une petite épaisseur radiale. Ce dispositif permet donc d'accroître la vitesse du champ.

Les quatre moteurs sont alimentés par deux transformateurs installés sous la caisse. Pour la marche normale, les secondaires de ces transformateurs sont montés en triangle, et réduisent la tension de 10000 volts à 1150 volts; au démarrage, les secondaires sont groupés en étoile de façon à fournir une tension de 2000 volts aux bornes des moteurs. La puis-

Digitized by Google

sance totale des quatre moteurs peut donc être portée à 3000 chevaux pendant le démarrage.

La voiture est munie d'un frein à main et d'un frein Westinghouse.

Toutes les manœuvres des appareils mécaniques et électriques se font au moyen de l'air comprimé.

La voiture porte à chaque extrémité trois archets mobiles autour du même axe vertical. Les deux axes sont à une distance de $17^{m},640$.

La ligne de contact est analogue à celle de Gross-Lichterfelde. Elle est formée de trois conducteurs de cuivre dur disposés dans un même plan vertical, et fixés à des isolateurs portés par la corde verticale d'un arc en fer à U boulonné sur un poteau installé latéralement à la voie. Le plan des conducteurs est à une distance de $2^{m},250$ de l'axe de la voie. Le conducteur inférieur est à $5^{m},500$ au-dessus des rails; la distance entre deux conducteurs voisins est de 1^{m}. La conduite est munie tous les kilomètres d'un tendeur.

FIN.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE I.

Historique. — Principes généraux.

Pages.

§ I. — *Historique* 1

§ II. — *Principes généraux* 8

I. Courants polyphasés 8

Courant diphasé 9

Courant triphasé 10

Système monocyclique 12

II. Production d'un champ magnétique tournant au moyen d'un courant polyphasé 14

Production d'un champ magnétique tournant au moyen d'un courant diphasé 14

Production d'un champ magnétique tournant au moyen d'un courant triphasé 16

III. Principe des moteurs à courant polyphasé ou à champ tournant 21

Moteurs synchrones 21

Moteurs asynchrones 23

CHAPITRE II.

Production des courants polyphasés.

GÉNÉRATRICES DE COURANTS POLYPHASÉS 25

§ I. — *Principes généraux* 25

1° Montage polygonal ou fermé 25

2° Montage ouvert ou en étoile 28

Cas d'une génératrice de courant triphasé 29

Montage en triangle 29

Montage en étoile 29

Puissance de la machine 30

Recherches expérimentales sur une machine à courant triphasé 30

Digitized by Google

Pages.

§ II. — *Force électromotrice d'une génératrice de courant polyphasé et réaction d'induit* 34

I. Force électromotrice d'une génératrice à circuit ouvert.. 34
Facteur de forme 34
Facteur de distribution 36
Formule de M. Kapp 38
Détermination des courbes de la tension et du courant... 39
II. Utilisation d'une génératrice de courant polyphasé comme machine à courant alternatif simple..... 41
Génératrice de courant diphasé 41
Génératrice de courant triphasé 42
III. Réaction d'induit 45
Étude théorique 45
Méthode de M. Behn-Eschenburg..... 55
Méthode de M. Rothert..... 61
Méthode de M. Heyland..... 64

III. — *Puissance et rendement d'une machine à courant polyphasé*.. 69
Puissance d'une machine à courant polyphasé 69
Rendement 71
Fréquence..... 71

IV. — *Excitation et réglage de la tension des génératrices*..... 71
Excitation des génératrices..... 71
Dispositif de M. Danielson 73
Dispositif de la *General Electric Company*..... 74
Excitatrice compoundeuse Hutin et Leblanc 76

V. — *Accouplement des génératrices* 79
Conditions exigées pour l'accouplement 79
Degré d'irrégularité 81
Amortissement des oscillations du champ..... 87

§ VI. — *Description de machines à courant polyphasé*..... 88

Machine Gramme pour bougies Jablochkoff, 88. — Génératrice de courant diphasé formée de deux machines à courant alternatif, 89. — Machine de la *Westinghouse Electric and Manufacturing Company*, 90. — Machine Thury de l'usine de Chèvres, 91. — Montage d'un groupe de deux machines à courant alternatif en génératrice de courant triphasé, 92. — Transformation d'une machine à courant alternatif en génératrice de courant diphasé, 92.

Classification des machines à courant polyphasé modernes.... 93
I. Induits à enroulement continu..... 95
Force électromotrice et puissance d'une machine à courant alternatif simple 95
Force électromotrice et puissance d'une machine à courant diphasé..... 97
Force électromotrice et puissance d'une machine à courant triphasé..... 99

Digitized by Google

Pages.

Expériences de M. Friese 101
Augmentation de la fréquence..... 102
Machines Schuckert à courant diphasé, de Budapest..... 102
Machines à double courant..... 104
II. Induits à pôles 106
Exemple..... 106
III. Induits à enroulement enchaîné..... 109
Force électromotrice et puissance d'une machine à courant diphasé..... 109
Force électromotrice et puissance d'une machine à courant triphasé..... 110
Description de machines à courant polyphasé..... 112
IV. Machines unipolaires 133
Premiers types de machines unipolaires..... 133
Description de quelques machines unipolaires..... 136

Génératrices asynchrones 145

PRODUCTION D'UN COURANT POLYPHASÉ AU MOYEN D'UN COURANT ALTERNATIF SIMPLE 145

§ I. — *Division d'un courant alternatif en deux courants différant en phase, au moyen de l'inductance*..... 146
Emploi d'un transformateur à très faible charge 146
Emploi d'une bobine de self-induction..... 147
Application au démarrage des moteurs à courant alternatif asynchrones..... 149

§ II. — *Division d'un courant alternatif simple en deux courants différant en phase, au moyen de condensateurs*..... 149
Dérivation ne possédant que de la capacité..... 149
Circuit possédant de la résistance, de l'inductance et de la capacité..... 150
Exemples 154
Cas de deux circuits possédant de la résistance, de l'inductance et de la capacité, en parallèle 156
Moteur Schallenberger..... 159

CHAPITRE III.

Canalisation des courants polyphasés.

CALCUL DES CANALISATIONS A COURANTS POLYPHASÉS 162

§ I. — *Notions élémentaires*..... 162
I. Canalisations à courant diphasé..... 162
II. Canalisations à courant triphasé..... 168
Générateur et récepteurs montés en triangle 168
Générateur et récepteurs montés en étoile 174

Digitized by Google

Pages.

III. Cas de circuits décalant le courant 177
Ligne à courant alternatif. 177
Ligne à courant triphasé 179

§ II. — *Étude complémentaire* 180
Ligne à courant triphasé desservant des lampes 180
Montage des lampes en triangle 181
Montage des lampes en étoile 185

§ III. — *Chute de tension dans les canalisations* 189
I. Ligne à courant alternatif 189
II. Ligne à courant diphasé 199
III. Ligne à courant triphasé 206
1° Cas de charges égales dans les trois sections 206
2° Cas d'une seule section chargée 210
3° Cas de deux sections chargées 212
4° Ligne mixte à courant triphasé et à courant alternatif. 214

§ IV. — *Décalage en divers points d'une distribution* 216
I. Décalage au point d'utilisation 216
II. Décalage à l'usine génératrice 218

§ V. — *Inductance et capacité des lignes* 220
I. Inductance des lignes aériennes 220
Ligne à courant alternatif 220
Ligne à courant triphasé 223
II. Résistance d'un fil au courant alternatif 225
III. Capacité des lignes aériennes 226
IV. Canalisations souterraines 229
V. Rigidité électrostatique et capacité inductive 231

CONSTRUCTION DES CANALISATIONS 234
I. Canalisations souterraines 235
II. Canalisations aériennes 236
Isolateurs 236
Exemples de lignes aériennes 246

Ligne de Lauffen-Francfort, 246. — Ligne des chutes du Niagara à Buffalo, 247. — Ligne de Eichdorf-Grünberg, 248. — Ligne de Fresno, 249. — Ligne de Ogden à Salt Lake City, 251. — Ligne alimentant la ville de Butte, 252.

Emploi de l'aluminium 252
Poteaux 253

RÈGLEMENTS RELATIFS AUX CANALISATIONS 254
1° Canalisations aériennes 254
2° Canalisations souterraines 256

Digitized by Google

CHAPITRE IV.

Transformation des courants polyphasés.

Pages.

§ I. — *Transformateurs statiques* 258

I. Transformateurs à courant diphasé 258
II. Transformateurs à courant triphasé 263
Exemples de transformateurs à courant triphasé 269
III. Calcul des transformateurs 274
Force électromotrice d'un transformateur 274
Pertes par hystérésis et courants de Foucault 275
Élévation de température en fonction de la surface refroidissante par watt perdu 276
Courant à vide 278
IV. Montage en quantité des transformateurs à courant triphasé 279
V. Transformation d'un courant diphasé en courant triphasé, et réciproquement (système C.-F. Scott) 280
Théorie de la transformation 289
Transport d'énergie des chutes du Niagara à Buffalo 286
Transport d'énergie dans la ville de Hartford 286
VI. Transformation de l'usine génératrice 286
VII. Isolation et refroidissement des transformateurs 289
Refroidissement par ventilation naturelle 289
Refroidissement par insufflation d'air 290
Isolation et refroidissement par l'huile 291
VIII. Chute de tension dans les transformateurs 292
Essais de M. Görges 294
Méthode de M. Kennelly 294
Exemple I 297
Exemple II 297
IX. Détermination des pertes de puissance dans les transformateurs 298
Pertes de puissance dans les enroulements 298
Pertes de puissance dans le noyau magnétique 298
Séparation des pertes par hystérésis et par courants de Foucault 298
Méthode de M. C.-F. Scott 299
X. Dispositifs de sûreté 303
XI. Transformateurs divers 305

§ II. — *Transformateurs rotatifs. — Changeurs de fréquence* 306

I. Transformateurs rotatifs 306
II. Changeurs de fréquence 307
Changeur de fréquence de Buffalo 307
Changeur de fréquence Stanley 308
Changeur de fréquence de Brooklyn 309

Digitized by Google

CHAPITRE V.

Conversion des courants polyphasés en courant continu et réciproquement.

Pages.

CONVERTISSEURS 311

§ I. — *Transformation au moyen de deux machines* 311
Exemples 312

§ II. — *Transformateurs rotatifs à double enroulement* 313
Transformateur Lahmeyer 316

§ III. — *Transformateurs rotatifs à enroulement unique ou convertisseurs* 317

I. Principe et forces électromotrices des convertisseurs 317
II. Convertisseur à courant alternatif simple 321
III. Convertisseur à courant diphasé 331
IV. Convertisseur à courant triphasé 338
V. Convertisseur à courant hexaphasé 345
VI. Tableau synoptique relatif aux divers convertisseurs 352
VII. Réaction d'armature 354
1° Convertisseur à courant alternatif simple 354
2° Convertisseurs à courant polyphasé 356
Convertisseur à courant diphasé 356
Convertisseur à courant triphasé 356
Convertisseur à courant hexaphasé 356
Réactions diverses 357
VIII. Courants sans puissance et compoundage 358
Composante magnétisante et composante démagnétisante 358
Réglage de la tension au moyen de transformateurs à rapport de transformation variable 360
Compoundage à l'aide de l'inductance des canalisations ou de bobines de réaction 360
Compoundage à l'aide de transformateurs à forte dispersion 362
IX. Démarrage des convertisseurs 362
Première méthode 362
Deuxième méthode 363
Troisième méthode 363
Quatrième méthode 364
X. Choix de la fréquence 367
XI. Mouvement pendulaire 368
Divers dispositifs d'amortissement 369
XII. Convertisseur inversé 369
Réglage de la vitesse : procédé Lamme 371
Convertisseurs inversés de la *Union Railway Company* 372

Digitized by Google

Pages.

XIII. Exemples de convertisseurs 372
XIV. Applications multiples 377

§ IV. — *Divers modes de transformation d'un courant polyphasé en courant continu ou en courant redressé* 378

I. Transformateur de courant polyphasé en courant continu, à inducteur et induit fixes, et à balais tournants 378
II. Transformateur Hutin et Leblanc 380
III. Redresseurs ou rectifieurs 381
IV. Redresseur électrolytique 383

CHAPITRE VI.

Moteurs à courant polyphasé ou à champ tournant.

§ I. — *Moteurs synchrones et moteurs asynchrones* 385

§ II. — *Moteurs synchrones* 386

I. Généralités 386
II. Démarrage des moteurs synchrones 392
III. Excitation des moteurs synchrones 395
IV. Courants sans puissance. Réaction d'armature 396

§ III. — *Moteurs à champ tournant asynchrones, ou moteurs d'induction.* 401

I. Généralités 401
II. Étude du champ magnétique engendré par un anneau Gramme alimenté en deux points diamétralement opposés 402
III. Étude d'un moteur asynchrone, ou d'induction, à une onde. 410
IV. Étude d'un moteur asynchrone à plusieurs ondes 424
Application 428
V. Considérations pratiques 430
Inducteur 430
Induit 431
Nombre de cannelures 432
Forme des cannelures 433
Noyau 435
Glissement de l'armature par rapport au champ 437
Rendement et facteur de puissance 438
VI. Valeur du couple moteur $\mathfrak{M}$ en fonction de la vitesse du moteur 440
VII. Réversibilité des moteurs d'induction 445
VIII. Démarrage des moteurs d'induction 447
IX. Modification de la vitesse d'un moteur d'induction 454
X. Description de moteurs asynchrones 457
Moteur de 35 HP 457
Moteur Westinghouse de 500 HP 458

Digitized by Google

Pages.
Moteur Alioth de 500 HP 459
Moteur d'Œrlikon de 570 HP 461
Moteurs Alioth 463
Moteur Siemens et Halske 464
XI. Moteurs d'induction à courant alternatif 466

CHAPITRE VII.

Compteurs d'énergie électrique pour courants polyphasés.

§ I. — *Compteurs pour courant diphasé* 469

§ II. — *Compteurs pour courant triphasé* 469
I. Considérations générales 469
II. Compteur Aron 473
III. Compteur E. Thomson 473
IV. Compteur Siemens et Halske 474
V. Compteur Duncan 476
VI. Ondographe E. Hospitalier 478

CHAPITRE VIII.

Application des courants polyphasés à la traction.

§ I. — *Considérations générales* 480

§ II. — *Transport de la puissance par courant polyphasé et distribution aux véhicules par courant continu* 482

§ III. — *Transport et distribution aux véhicules de la puissance par courant polyphasé* 484
I. Généralités 484
II. Divers modes de distribution de la puissance 488
III. Choix de la fréquence 492
IV. Démarrage et réglage de la vitesse 493

CHAPITRE IX.

Descriptions d'installations pour le transport et la distribution d'énergie électrique par courants polyphasés.

§ I. — *Transport d'énergie de Lauffen à l'Exposition de Francfort, en* 1891 497

§ II. — *Installation de Budapest* 499

§ III. — *Distribution d'énergie dans les gares de Dresde* 501

Digitized by Google

Pages.

§ IV. — *Installation de la fonderie de Mulhouse* 501

§ V. — *Installation des chutes du Niagara* 503

§ VI. — *Installation de Regla-Pachuca* 505

§ VII. — *Transport d'énergie à Hartford* 507

§ VIII. — *Transport d'énergie de la rivière Ogden à Salt Lake City* ... 509

§ IX. — *Transport d'énergie électrique à Fresno* 511

§ X. — *Installation de Bakersfield* 513

§ XI. — *Transport d'énergie électrique de la Manufacturing Company de Chambly* 516

§ XII. — *Installation des mines de Carmaux* 519

§ XIII. — *Installation pour l'épuisement du Delta Memel* 520

§ XIV. — *Installation de Mechanicsville* 520

§ XV. — *Distribution d'énergie électrique à Lyon* 523

§ XVI. — *Tramways de Marseille* 539

§ XVII. — *Tramways à courant triphasé de Lugano* 541

§ XVIII. — *Chemin de fer de Stansstad à Engelberg* 542

§ XIX. — *Expériences de traction par courant triphasé, par la maison Siemens et Halske* 545

§ XX. — *Expériences de traction à grande vitesse* 550

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

32008 Paris. — Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, quai des Grands-Augustins, 55.

Digitized by Google

32005 PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Grands-Augustins, 55

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

89089713630
B89089713630A

Digitized by Google

Digitized by Google

89089713630
b89089713630a
Digitized by Google